

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño del sistema de automatización para una
dosificadora de jalea**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Mauricio Corella Oconitrillo

Cartago, Junio de 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



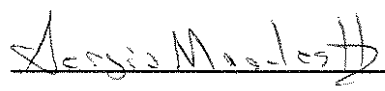
Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor tutor



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector



Ing. Sergio Morales Hernández

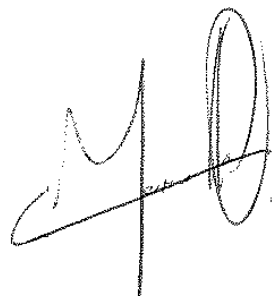
Profesor lector

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a vertical line, representing the name Mauricio Corella Oconitrillo.

Mauricio Corella Oconitrillo

Cédula: 1-1292-0698

Resumen

Los sistemas de automatización en los procesos de producción permiten optimizar los recursos que poseen las compañías. Dependiendo de las necesidades, estos sistemas pueden eliminar puestos de trabajo manual, incrementar velocidad de producción, mejorar los estándares de calidad, entre otros.

En este proyecto se describe el proceso de diseño de un sistema de control automático en una línea de producción de alimentos, específicamente en el proceso de dosificación y empaque de jalea de frutas de la empresa Productos Ujarrás S.A. la cual este documento denomina como la empresa, basándose en las técnicas y estándares actuales de la electro-mecánica industrial con un sistema secuencial basado en PLC utilizando aire comprimido como fuente de energía mecánica.

Palabras clave: Automatización, Controladores Lógicos Programables, Línea de producción.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	iii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
Introducción.....	1
Capítulo 1: Funcionamiento actual de la máquina de empaque.....	2
1.1 Problemas identificados.....	2
1.2 Síntesis del problema.....	3
1.3 Solución seleccionada.....	3
Capítulo 2: Meta y Objetivos	6
2.1 Meta.....	6
2.2 Objetivo general.....	6
2.3 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 3: Procedimiento para el desarrollo del proyecto	7
3.1 Recopilación de información	7
3.2 Análisis de la información obtenida.....	8
3.3 Evaluación de las alternativas de automatización	10
3.4 Implementación del sistema electro-neumático	14
3.4.1 Sistema neumático	14
3.4.1.1 Secuencia de movimiento de los actuadores neumáticos del sistema 1.....	15
3.4.2 Sistema eléctrico	17
3.4.2.1 Control del Operador.....	17
3.4.2.2 Caja de control	21
3.4.3 Seguridad	24
Capítulo 4: Descripción del sistema	25
4.1 Descripción del <i>hardware</i>	25
4.1.1 Actuadores.....	25
4.1.2 Sensores.....	28
4.1.3 Válvulas de control	30

4.1.4	PLC	31
4.1.5	Unidad de mantenimiento de aire	31
4.1.6	Generación del aire comprimido	33
4.2	Mantenimiento del sistema	35
4.2.1	Mantenimiento predictivo	35
4.2.2	Mantenimiento preventivo o programado	36
4.3	Descripción del <i>software</i>	37
4.3.1	'Machine'	37
4.3.2	'PLC_PRG'	41
4.3.3	Visualizador	44
Capítulo 5: Análisis del sistema		46
5.1	Porcentaje de error del contenido neto de producto dosificado	46
5.2	Simulación de los actuadores	48
5.3	Manejo del sistema por parte de los operarios	50
5.4	Tiempo de calibración y re-calibración del nuevo sistema	51
5.5	Capacidad de producción del nuevo sistema	52
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones		53
6.1	Conclusiones	53
6.2	Recomendaciones	53
Bibliografía		55
Apéndice		56
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología	56
A.2	Ficha del operario	59
A.3	Información sobre la empresa	60
Anexo 1		61
Manual del sensor de posición del actuador 1-1A1		61
Anexo 2		64
Tabla de referencia de costos del sistema		64
Anexo 3		65
Resultados del estudio de densidad de jalea de fresa		65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Bosquejo de la solución	4
Figura 2 Funcionamiento del compresor de tornillo doble [3]	12
Figura 3 Modo de funcionamiento del compresor recíprocante [4].....	13
Figura 4 Ejemplo de costo del aire comprimido proyectado a diez años [5]	13
Figura 5 Esquema neumático del Sistema 1.....	14
Figura 6 Códigos de identificación para los componentes del sistema	15
Figura 7 Diagrama de posición-tiempo de los actuadores 1-1A1 y 1-2A1	17
Figura 8 Diseño CAD del Control Central	18
Figura 9 Diagrama de flujo de la pantalla táctil del Control Central	19
Figura 10 Página principal de la pantalla del Control Central	19
Figura 11 Pantalla de selección de producto	20
Figura 12 Pantalla de recalibración	20
Figura 13 Diseño físico del Control Local del sistema	21
Figura 14 Diagrama de conexión eléctrica del sistema [6].....	22
Figura 15 Diagrama de conexión del actuador 1-1A1 al PLC con el sensor de detección de posición [8]	26
Figura 16 Relación velocidad-masa del cilindro 1-2A1 [9]	27
Figura 17 Sensor de proximidad tipo <i>Reed</i> [10]	28
Figura 18 Diagrama de conexión de los sensores de proximidad 2S1 y 2S2 [11]	29
Figura 19 Criterio de selección del secador de aire [12]	32
Figura 20 Medidor de diferencia de presión de un filtro marca Kaeser [13]	36
Figura 21 Diagrama de flujo de la sección de calibración del archivo ' <i>Machine</i> '	38
Figura 22 Diagrama de flujo de la sección de calibración del archivo ' <i>Machine</i> ' (continuación)	39
Figura 23 Diagrama de flujo para la puesta en marcha del modo Carrera del sistema	40
Figura 24 Diagrama de flujo del modo Carrera del sistema (continuación)	41
Figura 25 Temporizadores del sistema programados	42
Figura 26 Conjunto de diagrama de bloques del sistema	43
Figura 27 Conjunto de diagramas de bloques del sistema (continuación)	44
Figura 28 Programa de visualización y simulación del sistema.....	45
Figura 29 Resultados de la simulación del actuador 1-1A1 utilizando el <i>software</i> GSED [9].....	49
Figura 30 Resultados de la simulación del actuador 1-2A1 utilizando el <i>software</i> GSED [9].....	49
Figura 31 Prueba de manejo del sistema aplicada a los operarios que manejarán el sistema.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del aire comprimido para producción de alimentos según la norma ISO-8573-1	8
Tabla 2 Dimensiones relevantes de la planta.....	8
Tabla 3 Condiciones de la elaboración del muestreo de contenido de masa en unidades empacadas	9
Tabla 4 Resumen de resultados obtenidos del muestreo de medición de masa según disposiciones del MEIC	9
Tabla 5 Mediciones promedio de calibración y recalibración del sistema	10
Tabla 6 Resumen de ventajas y desventajas de implementar un sistema neumático y electro-neumático	11
Tabla 7 Códigos de identificación de los componentes del sistema	15
Tabla 8 Pasos del movimiento de los actuadores del sistema 1	16
Tabla 9 Numeración y rotulación de los bornes de la caja de control	23
Tabla 10 Resumen de las especificaciones de los actuadores del sistema 1	27
Tabla 11 Resumen de las especificaciones de los actuadores del sistema 1 (continuación).....	28
Tabla 12 Resumen de las especificaciones de las electroválvulas del sistema 1	31
Tabla 13 Componentes necesarios en la unidad de mantenimiento de aire para cumplir con la norma ISO-8573-1	31
Tabla 14 Pérdida de presión en los diferentes dispositivos del sistema neumático [3]	33
Tabla 15 Comparación de características del compresor de tornillo y el compresor reciprocante	35
Tabla 16 Resumen de las especificaciones para determinar el error del contenido neto de producto dosificado	46
Tabla 17 Error relativo de masa dosificada para cada una de las presentaciones de jalea a empacar	48
Tabla 18 Resultados obtenidos de la evaluación sobre el manejo del sistema por parte de los operarios	51
Tabla 19 Tiempos promedio de calibración y recalibración del sistema simulado.....	52
Tabla 20 Resumen de la simbología neumática utilizada en este proyecto [10]	57
Tabla 21 Costos de referencia de los componentes asociados al proyecto.....	64

Introducción

El presente documento explica el procedimiento seguido para el diseño de un sistema de automatización en la línea de empaque de jalea.

Se expone la forma en que se recopiló la información necesaria para la definición del problema, como los tiempos de llenado y el error en el contenido neto pre-empacado. Los datos recopilados preliminarmente sirvieron para plantear un problema y su respectiva solución que se adaptara a las características de la planta y su entorno. Para la solución planteada se consideraron las restricciones que se deben tomar en cuenta para el diseño del sistema en aspectos de salud y regulaciones legislativas para productos de consumo humano.

Como parte del diseño, se describen además los componentes de *hardware* y de *software*, así como los criterios que se utilizaron para su selección, diseño y configuración tomando en cuenta la interacción que los operarios tendrán con el nuevo sistema. Una vez diseñado se presenta un análisis teórico de su funcionamiento y el impacto que tendrá en la producción una vez implementado.

Este proyecto permite evidenciar los beneficios que brindan a las empresas medianas automatizar los procesos, en lo que se refiere a volumen y costos de producción así como la mejora en la calidad del producto que se elabora.

Capítulo 1: Funcionamiento actual de la máquina de empaque

1.1 Problemas identificados

Algunas de las máquinas utilizadas en el proceso de fabricación de sus productos fueron adquiridas desde que la fábrica inició operaciones, de modo que estas necesitan ser reemplazadas o modernizadas. Específicamente en este proyecto se busca modernizar la máquina de llenado que se utiliza en el proceso de empaque de jalea en sus diferentes presentaciones para su posterior distribución a los diferentes puntos de venta.

La máquina dosificadora de jalea (la cual se denomina en este documento como la planta) utiliza un sistema electromecánico conformado por una tolva, un motor CA, pistones, engranajes, entre otros, la cual debe ser ajustada manualmente por los operarios haciendo girar una tuerca cada vez que se desea variar la cantidad de jalea por empaque, esta tuerca se encuentra en el rotor de un motor, al girar esta tuerca se varía el tiempo que el paso mecánico se mantiene abierto en el ducto dosificador, de modo que varía la cantidad de producto depositado por envase. Debido al desgaste del sistema y a la variación de la presión que ejerce el producto que se encuentra en la tolva, la máquina se desajusta constantemente mientras opera, requiriendo reajustes periódicos, lo cual requiere detener el proceso de empaque del producto cada vez que se debe ajustar la máquina. Además, cuánto y cuándo se debe girar la tuerca de calibración es algo que solo los operarios más experimentados conocen (es un proceso empírico), lo cual es un gran problema para la producción cuando estos operarios no están disponibles.

Es de suma importancia tener en cuenta algunos aspectos del entorno del proyecto debido a la naturaleza de este, que es la elaboración de productos alimentarios para su venta y consumo para las personas: el control y el conocimiento del contenido neto de producto de cada envase empacado por parte del productor, pues esto es un factor que es regulado por ley, en el que es permitido un porcentaje de error en el contenido neto del paquete según lo etiquetado en el envase, de modo que la empresa se puede enfrentar a demandas legales por parte de consumidores insatisfechos o por parte del Ministerio de Economía Industria y Comercio (se referirá en este documento como MEIC) si el contenido del envase es menor al etiquetado, pero por otro lado la empresa se ve afectada con pérdidas económicas si en cada envase se deposita un exceso de producto por el cual no se obtienen ganancias y más bien se pierde ese producto.[1] Además, la utilización de materiales higiénicos para la elaboración del sistema es obligatoria, pues debe cumplir con los requisitos del Ministerio de Salud de Costa Rica. [2].

Debido al mecanismo que utiliza la planta para establecer la cantidad de producto por empaque y a que la calibración de la máquina se realiza de forma manual y empírica, se presentan varios problemas:

Cómo garantizar el contenido neto depositado en cada envase de jalea empacada según la información etiquetada y los márgenes de error permitidos y establecido por el MEIC, esto sin detener el proceso de empaque en la línea de producción.

En cuanto al procedimiento manual de calibración y utilización del sistema, existe la posibilidad de una mala calibración de la máquina ya sea por descuido, negligencia o impericia del operario, pues solo los operarios más experimentados utilizando la planta conocen como calibrarla adecuadamente. Además, las muestras tomadas de contenido neto de los envases se realizan cada vez que los operarios lo creen oportuno, de modo que no se tiene certeza de que este muestreo se realice de forma correcta y con la periodicidad adecuada, permitiendo que algunas de las unidades empacadas tengan en su contenido neto, un porcentaje de error mayor al permitido por el MEIC, ya sea con más o menos producto de lo etiquetado.

Adicionalmente, para la calibración y el muestreo que se debe realizar, es necesario detener el proceso de envasado y empaque, pues el dispositivo mecánico donde se calibra la máquina (una tuerca) está colocada en una pieza móvil rotatoria de la máquina dosificadora, siendo imposible para el operario calibrar la máquina mientras opera; del mismo modo, el muestreo del contenido neto de los envases empacados debe ser realizado ya sea por un operario adicional, o por el mismo operario que maneja la máquina de llenado pero este debe detener el proceso de envasado para poder realizar estas mediciones.

1.2 Síntesis del problema

¿Cómo mejorar la eficiencia de la máquina de envasado que es utilizada en el proceso de empaque de jalea para las diferentes presentaciones y sabores que se ofrecen a los consumidores en la empresa?

1.3 Solución seleccionada

El proyecto consiste en el mejoramiento del mecanismo de dosificación de la planta, utilizando la misma tolva. Se reemplazará el sistema electro-mecánico actual (conformado por un motor CA, pistones, piñones, entre otros), por un sistema de automatización electro-neumático (de ahora en adelante denominado como el sistema) el cual será diseñado utilizando un compresor de aire, actuadores lineales neumáticos, sensores electrónicos y un controlador lógico programable (PLC). En la Figura 1 se muestra un bosquejo realizado en CAD de la solución planteada.

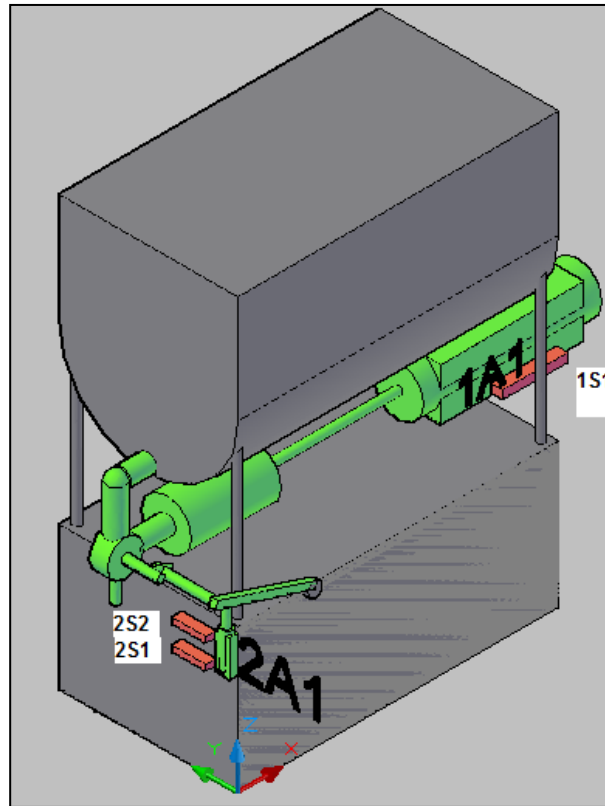


Figura 1 Bosquejo de la solución

Tomando en cuenta características físicas de producto a empaquetar como su densidad (nótese que esta característica va a depender de la fruta con la que se elabora la jalea que se está empaquetando) y realizando los cálculos pertinentes junto con una caracterización adecuada de la planta, se logrará envasar la masa de producto requerida.

Se dispondrá de una interfaz de usuario que permitirá el manejo del sistema por parte de los operarios de forma rápida y sencilla, utilizando menús de selección, de modo tal que el encendido, apagado, calibración, utilización y limpieza de la máquina puedan ser realizados por cualquier operario sin ningún conocimiento técnico, únicamente con la ayuda de una "Ficha Para el Operario" que se encontrará disponible en el lugar de trabajo.

A partir de dos datos ingresados por el usuario: el tipo de producto y la cantidad en gramos a dosificar, el sistema tendrá suficiente información para poder dosificar adecuadamente el producto.

El cálculo de dosificación se realiza por medio de la medición del recorrido del actuador 1-1A1 el cual provoca un movimiento de succión y empuje en la bomba de jalea. Para dicho cálculo se debe tomar en cuenta la diferencia de distancia en la posición inicial y final del émbolo del cilindro la cual será la misma que la del émbolo de la bomba de jalea, así conociendo las dimensiones de la bomba de jalea se puede determinar un volumen desplazado. Por último se debe tomar en cuenta la densidad del producto que se encuentra dentro de la bomba de

jalea para poder determinar la masa del producto dosificado en función del volumen.

Conociendo el producto que se va a manipular, el sistema sabrá la densidad del mismo gracias a datos previamente obtenidos experimentalmente y que se encuentran en la memoria del PLC. La relación de la densidad ρ mostrada en la Ecuación 1 permitirá obtener el volumen requerido para obtener la masa adecuada,

$$\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{m}{V} \quad (1)$$

y a partir del volumen requerido se obtiene el recorrido h que debe realizar el émbolo de la bomba según la relación de la Ecuación 2

$$V[cm^3] = \pi \times r^2 \times h \quad (2)$$

El sistema es escalable, de modo que a partir del sistema creado se puede seguir automatizando y mejorando la línea de producción y empaque en el desarrollo de proyectos posteriores, según las necesidades de la empresa.

Como referencia para el diseño de dicho sistema se utilizó documentación técnica de componentes de la marca Kaeser para la sección de producción de aire comprimido y la marca Festo para actuadores, sensores, PLC e interfaz de usuario.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Confeccionar un sistema de fabricación de jalea optimizado, aumentando la capacidad de producción de la planta y mejorando la calidad del producto, haciendo uso adecuado de los recursos económicos disponibles.

2.2 Objetivo general

Elaborar un sistema que mejore el desempeño de la máquina de envasado de jalea en la fábrica Productos Ujarrás, ofreciendo un producto de calidad.

Indicador: Incrementar en 10% la cantidad de unidades envasadas por hora que cumplan con las condiciones de calidad establecidas por el MEIC de contenido neto.

2.3 Objetivos específicos

- 1) Diseñar un sistema de control automático que reduzca el error del contenido neto de jalea por envase.

Indicador: Limitar el porcentaje de error en el contenido neto del envase según lo establecido por el MEIC y lo etiquetado en el envase: 4,5% para envases de 100g a 300g, 3% para envases de 300g a 1kg, 1,5% para envases de 1kg a 15kg y 1% para envases de 15kg a 100kg.

- 2) Crear un sistema que reduzca el tiempo requerido para la calibración de la máquina de envasado de jalea

Indicador: Reducir en 50% el tiempo promedio medido en minutos y segundos que se tarda el operario en calibrar la máquina actualmente.

- 3) Desarrollar un sistema que pueda ser utilizado eficientemente por los operarios de la planta.

Indicador: Evaluación del uso del sistema por parte de los operarios con la ayuda de la "Ficha para el operario" debe ser aprobada en un 90%.

Capítulo 3: Procedimiento para el desarrollo del proyecto

3.1 Recopilación de información

Primeramente se hizo una observación de la planta en operación bajo condiciones normales para familiarizarse con el funcionamiento del sistema actual y los problemas que esta presenta, también se entrevistó al jefe de producción y a los operarios más experimentados con el funcionamiento de la misma para obtener información relevante que pudiera ayudar a determinar los aspectos que se debían mejorar.

El sistema que se implementará es para controlar una dosificadora de jalea el cual debe regular la cantidad de jalea que se deposita permitiendo un margen de error preestablecido en cada empaque mediante el movimiento de un émbolo de succión que bombea la jalea de la tolva al empaque, y una válvula mecánica el cual permite el paso de jalea de la tolva a la bomba de jalea o de la bomba al ducto dosificador. La cantidad de jalea que se deposita por empaque se controla mediante volumen, controlando el recorrido del émbolo de la bomba de jalea. Para lograr dicha tarea, se desarrolló un sistema electro-neumático, en el cual la parte neumática controla los movimientos mecánicos del sistema, y la parte eléctrica se encarga del control.

El sistema funcionará en un medio industrial de producción de alimentos, por lo cual debe cumplir con los estándares ISO de higiene para producción de alimentos, además en el lugar habrá presencia de agua y alimentos de modo que el sistema se debe poder limpiar fácilmente. Debido a que se utilizará aire comprimido para forzar el movimiento de los actuadores que se encuentran en la línea de empaque de alimentos, se debe garantizar una adecuada limpieza del aire. La norma ISO 8573-1 es el estándar utilizado para clasificar la pureza del aire comprimido utilizado en la industria en general. Se toman en cuenta tres características para determinar la calidad del aire comprimido como lo son la presencia de partículas sólidas, la humedad y la presencia de partículas de aceite. Cada una de estas características se clasifican por clases según la pureza del aire, donde la clase 0 es la más pura o limpia. La norma especifica el grado de pureza del aire en cada una de estas características para cada tipo de industria. En la Tabla 1 se muestra la clasificación del aire requerida según la norma ISO para la industria de alimentos.

Tabla 1 Características del aire comprimido para producción de alimentos según la norma ISO-8573-1

Característica del aire comprimido	Clase	Descripción
Partículas sólidas presentes	1	Número máximo de partículas presentes en un m³ de diámetro d(μm): 20,000 para 0,1<d<0,5 400 para 0,5<d<1,0 10 para 1,0<d<5,0
Humedad	4	Temperatura de rocío de descarga: ≤3°C
Aceite	1	Concentración de aceite (mg/m³): ≤0,01

3.2 Análisis de la información obtenida

Se realizó la caracterización de la planta (capacidad, dimensiones, entre otros) para obtener parámetros importantes que deben ser tomados en cuenta al realizar los cálculos para lograr la dosificación correcta de producto. A partir de los parámetros obtenidos, se definió el sistema y sus componentes. En la Tabla 2 se muestran las dimensiones relevantes obtenidas de de la planta.

Tabla 2 Dimensiones relevantes de la planta

característica	dimensión
largo de la bomba	23[cm]
diámetro interior de la bomba	8[cm]
largo del palo de la bomba	66[cm]
diámetro del palo de la bomba	2[cm]
diámetro de la boquilla dosificadora	2[cm]
volumen de la bomba de jalea	1156,11[cm ³]
Duración del ciclo de trabajo	1,661[s]

El nuevo sistema trabajará con un ciclo de trabajo similar para mantener la misma velocidad de empaque actual.

Posteriormente se elaboró un estudio estadístico para conocer numéricamente la situación actual del desempeño de la máquina. Para hacer el análisis estadístico del error de contenido neto de producto envasado, se debe seguir el procedimiento dispuesto por el MEIC sobre productos pre-empacados según el decreto N°22268 [1]. En la Tabla 3 se muestra las condiciones bajo las que se realizaron estas mediciones tomando en cuenta las disposiciones del MEIC y en la Tabla 4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir de este muestreo.

Tabla 3 Condiciones de la elaboración del muestreo de contenido de masa en unidades empacadas

presentación	guayaba bolsa
Contenido neto nominal (g)	100
tamaño del lote muestreado	1800
peso del envase (g)	4
cantidad de muestras	32
tomadas cada	50 unidades

Tabla 4 Resumen de resultados obtenidos del muestreo de medición de masa según disposiciones del MEIC

Medición	Contenido Neto	Desviación	Medición máxima	medición mínima	Desperdicio
	promedio (g)	(g)	(g)	(g)	(g/hora)
1	106,06	6,06	108	103	10912,5
2	101,72	1,72	104	98	3093,75
3	100,37	0,37	108	96	675
promedio	102,72	2,72	106,66	99	4896

Para el análisis estadístico de tiempo necesario para calibración y recalibración de la máquina y de producción, se tomaron mediciones de tiempo, en un ambiente real de producción en horas laborales de la planta. El tiempo de calibración se refiere a la primera calibración antes de iniciar el funcionamiento de la máquina y la recalibración se refiere a cada vez que se debe detener la línea de empaque para ajustar la máquina. El tiempo de recalibraciones recomendado es el tiempo promedio en que la calibración de la máquina cambia en al menos 1 gramo la cantidad que dosifica y el tiempo de recalibración por hora

recomendado es el tiempo que tomaría por hora hipotéticamente con el sistema antiguo si se quisiera mantener en un peso fijo la cantidad dosificada.

Tabla 5 Mediciones promedio de calibración y recalibración del sistema

actividad	tiempo promedio (s)
tiempo promedio de cada calibración	277
tiempo promedio de cada recalibración	30,86
tiempo entre recalibraciones recomendado	93
Tiempo de lavado	360
Tiempo recalibración por hora recomendado	1194

Para el diseño del sistema se utilizó software para programación, verificación y simulación de un controlador lógico programable (PLC) el cual se manejará mediante una interfaz de usuario con pantalla táctil con teclas para desplegar e introducir información respectivamente, un cilindro neumático para controlar el movimiento de la bomba de jalea y un cilindro neumático el cual abrirá y cerrará la válvula dosificadora, cada uno con sus respectivos sensores.

Se elaboró una "Ficha Para el Operario", el cual será el único documento necesario para la operación del sistema en el lugar de trabajo.

Una vez diseñado el sistema, se aplicaron estudios numéricos y estadísticos para poder elaborar un análisis numérico de los resultados obtenidos del proyecto.

Por último se realizó una presentación del producto final a los encargados de producción de la planta para obtener su aprobación.

3.3 Evaluación de las alternativas de automatización

Se estudiaron dos sistemas para su implementación según recomendaciones del vendedor técnico de la empresa ENESA, distribuidor de la marca Festo en Costa Rica: uno totalmente eléctrico y otro electro-neumático. La diferencia entre estos dos sistemas radica en el tipo de actuador que se utiliza.

El sistema totalmente eléctrico utiliza cilindros que realizan un movimiento de extensión y retracción que controlan su movimiento de avance y retroceso mediante un motor paso a paso y un convertidor de movimiento rotativo del motor a movimiento lineal del cilindro. Entre las ventajas que presenta este sistema es que se puede indicar con precisión la posición del actuador debido a que el PLC puede controlar su movimiento mediante los pasos del motor, esto permite prescindir de sensores de proximidad en los cilindros, además no sería necesario realizar una inversión inicial para la instalación de un compresor de aire y su respectiva distribución en la planta, pero por otro lado presenta la desventaja que estos actuadores no pueden entrar en contacto con agua o alimentos puesto que estos funcionan eléctricamente siendo esto un factor determinante para desechar esta posibilidad.

La segunda opción es el sistema electro-neumático. Este utiliza una parte electrónica de control y una parte actuadora neumática en la cual cilindros lineales son controlados mediante aire comprimido. Esta opción presenta la ventaja que los actuadores al ser controlados por aire comprimido estos pueden entrar en contacto con agua y alimentos sin ningún problema, característica que es necesaria para esta aplicación en específico, por lo tanto se utilizó un sistema electro-neumático. En la Tabla 6 se muestra un resumen comparativo de estos dos sistemas.

Tabla 6 Resumen de ventajas y desventajas de implementar un sistema neumático y electro-neumático

	Ventajas	Desventajas
Sistema electro-neumático	<ul style="list-style-type: none"> - Actuadores más económicos lo cual reduce el costo de escalamiento del sistema. - Actuador totalmente lavable. - Mayor cantidad de proveedores para los componentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe invertir en un compresor y tubería de aire comprimido lo cual incrementa la inversión inicial. - Control de los actuadores es más limitado. - Mayor mantenimiento.
Sistema electrónico	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor control del movimiento de los actuadores. - No requiere invertir en generación y distribución de aire comprimido. - Menor mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los actuadores no pueden entrar en contacto con agua o alimentos. - Actuadores más costosos lo cual aumenta el precio de escalamiento del sistema. - Lógica de control más compleja. - Repuestos y componentes más costosos.

Los sistemas neumáticos utilizan el aire comprimido para la realización de trabajo mecánico. La generación de aire comprimido se realiza mediante la utilización de un compresor. El compresor utiliza el movimiento mecánico para comprimir un fluido, que en este proyecto se requiere de aire comprimido. La mayoría de los compresores se analizan utilizando las leyes de gases ideales.

Los dos tipos de compresores de aire más utilizados en la industria son el compresor de tornillo y el compresor reciprocante. Cada tipo de compresor genera el aire comprimido de forma diferente.

El compresor de tornillo es de desplazamiento positivo, utiliza dos lóbulos helicoidales montados en paralelo pero sin entrar en contacto. Debido a la forma de los tornillos y a su movimiento sincronizado se logra reducir el espacio en el que se encuentra el aire atrapado entre estos dos tornillos y trasladarlo al mismo tiempo con un rango de operación amplio. Se clasifican en compresores de tornillo simple, de tornillo doble, de compresión seca y de compresión con superficies de trabajo lubricadas. En la Figura 2 se ilustra el funcionamiento de compresor de tornillo doble.

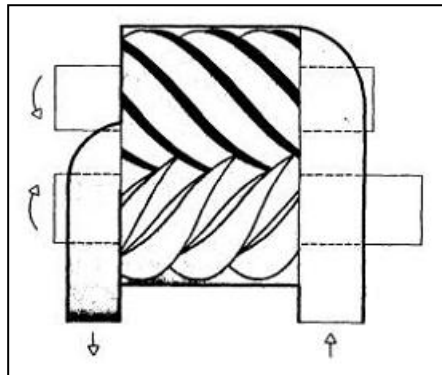


Figura 2 Funcionamiento del compresor de tornillo doble [3]

El compresor reciprocante son máquinas de movimiento alternativo, este utiliza pistones que realizan un movimiento de avance y retroceso que permite el ingreso de aire y luego lo comprime. Estos se pueden clasificar de varias formas: por número de etapas (una o dos etapas), por el modo de trabajar del pistón (de simple efecto, de doble efecto, de etapas múltiples y de pistón diferencial) y por el número y posiciones de los cilindros. En la Figura 3 se ilustra el funcionamiento de un compresor reciprocante.

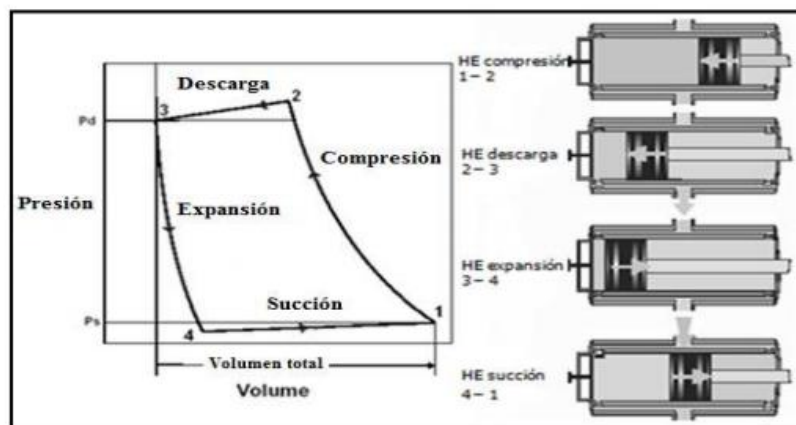


Figura 3 Modo de funcionamiento del compresor recíprocante [4]

Debido a que el mayor porcentaje de costos asociados a un sistema electro-neumático es el consumo eléctrico para la producción de aire comprimido, es importante seleccionar un compresor que aproveche de forma óptima la energía eléctrica consumida para que los costos de producción no se vean aumentados significativamente, de modo que se realizará un estudio del costo eléctrico del compresor seleccionado. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestra una gráfica de los costos relacionados a la utilización de un compresor de 100HP en jornadas de 24 horas en diez años de operación.

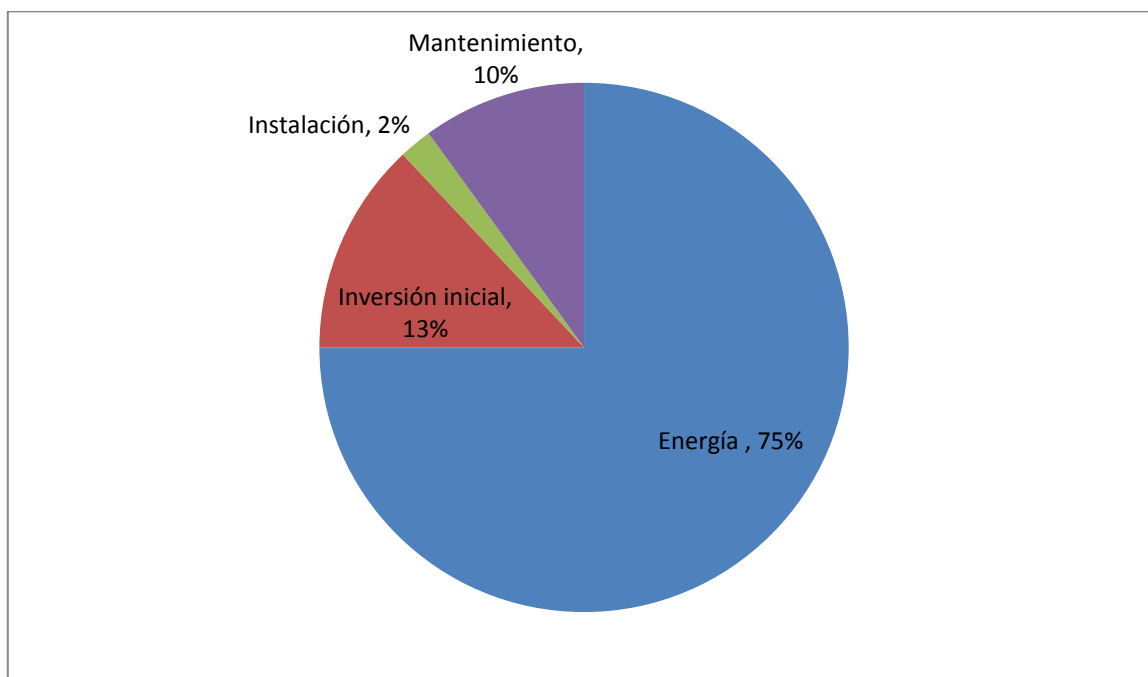


Figura 4 Ejemplo de costo del aire comprimido proyectado a diez años [5]

En la actualidad los dos tipos de compresores más utilizados en la industria son los compresores de pistón con aceite y de tornillo con aceite, sin embargo para aplicaciones de producción de alimentos, se recomienda la utilización de compresor de tornillo. A pesar de esta recomendación, se realizó una comparación de costo económico, ventajas y desventajas al utilizar estos dos tipos de compresores. Dicho análisis se muestra posteriormente.

3.4 Implementación del sistema electro-neumático

La solución se divide en dos secciones: la parte eléctrica y la parte neumática. Cada una de estas secciones se presenta de forma separada.

3.4.1 Sistema neumático

En la Figura 5 se muestra el esquema neumático del sistema denominado sistema 1.

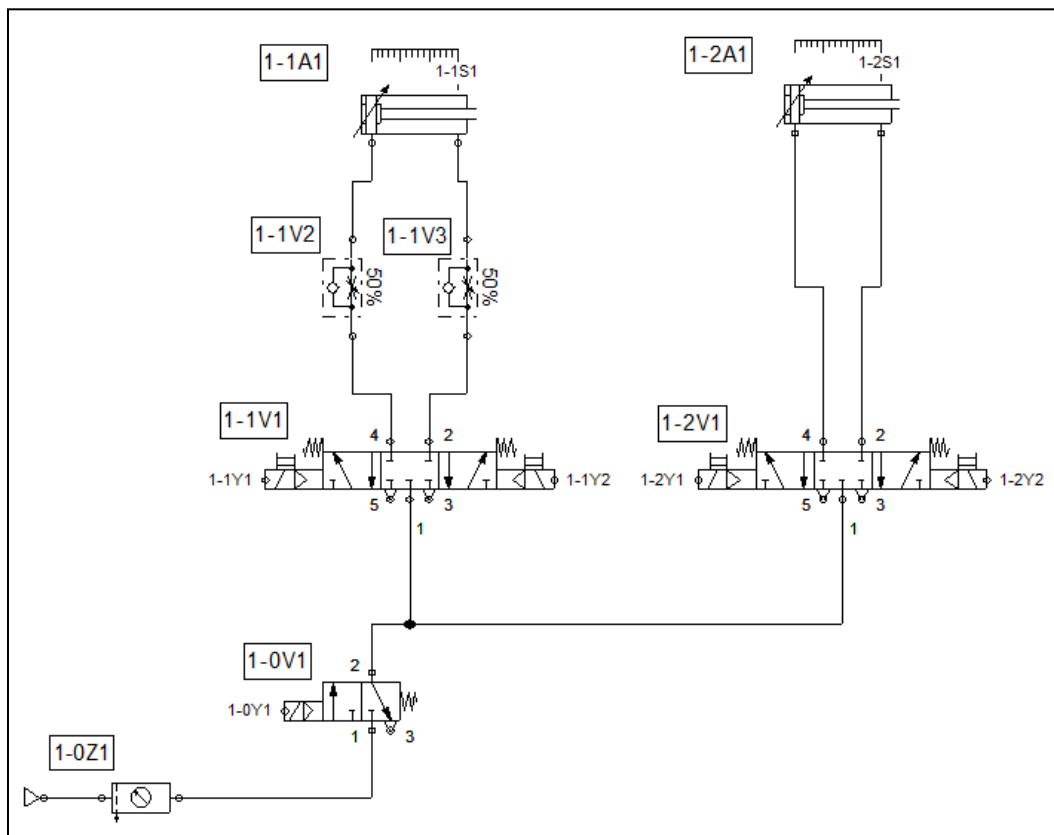


Figura 5 Esquema neumático del Sistema 1

Cada componente se identifica mediante una combinación de números y letras, el cual indica el tipo de componente y su ubicación. En la Figura 6 se muestra la nomenclatura de los códigos de identificación que se utiliza en el sistema.

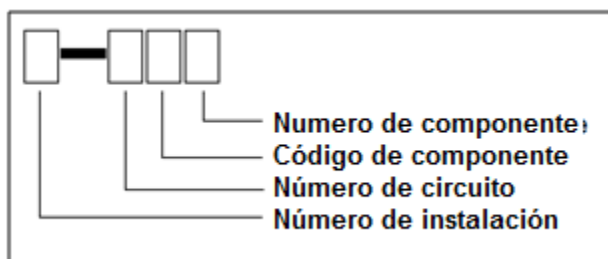


Figura 6 Códigos de identificación para los componentes del sistema

Número de instalación: identifica mediante un número al sistema electro-neumático dentro de la planta.

Número de circuito: Identifica mediante número al circuito neumático dentro del sistema electro-neumático.

Código de componente: Identifica mediante una letra el tipo de componente. En la Tabla 7 se encuentran los códigos de identificación utilizados en este sistema.

Número de componente: Identifica mediante número al componente dentro del circuito neumático.

Tabla 7 Códigos de identificación de los componentes del sistema

Componente	Letra de identificación
Válvulas	V
Sensores	S
Bobina de accionamiento eléctrico	Y
Otros (unidad de mantenimiento)	Z

3.4.1.1 Secuencia de movimiento de los actuadores neumáticos del sistema 1

1. En la posición inicial, el cilindro 1-1A1 se debe encontrar en la posición de final de carrera de avance de modo que el la bomba de jalea se encuentre vacía, y el cilindro 1-2A1 se debe encontrar en la posición de final de carrera de avance

de modo que la válvula mecánica de jalea permita el paso desde la tolva a la bomba.

2. El cilindro 1-1A1 se mueve en retroceso de modo que permita que la bomba de jalea succione jalea de la tolva.
3. Una vez llena la bomba de jalea, el cilindro 1-1A1 hace el movimiento de avance para expulsar la jalea que se encuentra en la bomba.
4. El cilindro 1-2A1 realiza un movimiento de retroceso para evitar el paso de jalea desde la tolva y permitir el paso de jalea desde la bomba hacia el ducto dosificador.
5. Una vez dosificada la cantidad adecuada de jalea, el cilindro 1-2A1 realiza un movimiento de avance para evitar el paso de jalea al ducto dosificador.

Se repite el proceso nuevamente

Para comprender mejor el funcionamiento de los actuadores, los datos se presentan en tres formas diferentes: en la Tabla 8 se muestra paso a paso el movimiento del sistema y en la Figura 7 se muestra el comportamiento en el tiempo de los actuadores.

Tabla 8 Pasos del movimiento de los actuadores del sistema 1

Paso	Cilindro 1-1A1	Cilindro 1-2A1	Fin de paso	Comentario
1	Posición inicial	Posición inicial	1S1=10V 2S2 activo	Botón Inicio para iniciar operación
2	Movimiento retroceso	no	1S1=0V 2S2 activo	Se llena la bomba de jalea
3	Movimiento avance	no	1S1=2V	Se elimina el aire de la bomba
4	Movimiento avance	Movimiento retroceso	1S1=Cant_dosif 2S1 activo	Inicio dosificación, El registro 'Cant_dosif' indica el valor que debe ser dosificado
5	Movimiento avance	Movimiento avance	2S2 activo	Se detiene la dosificación
1				

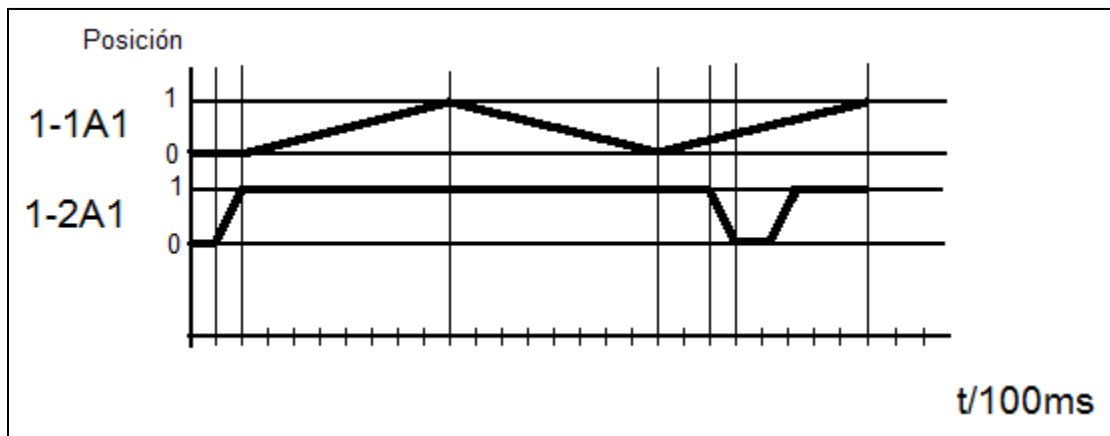


Figura 7 Diagrama de posición-tiempo de los actuadores 1-1A1 y 1-2A1

3.4.2 Sistema eléctrico

3.4.2.1 Control del Operador

El Control del Operador se divide en dos secciones: una sección llamada Control Local que se encuentra instalado directamente en la máquina dosificadora, y otra sección llamada Control Central que se encuentra instalado a mediana distancia.

El Control Central, que se muestra su diseño CAD Figura 8 se encuentra instalado en la superficie frontal exterior de la caja de control y cuenta con las siguientes características:

- Un interruptor S1 para encender y apagar el sistema.
- Una pantalla táctil para visualizar información importante y configurar el sistema, establecer el tipo y la cantidad de producto que se deposita por envase, además de re-calibrar sobre la marcha la cantidad de producto que se está depositando en cada empaque.

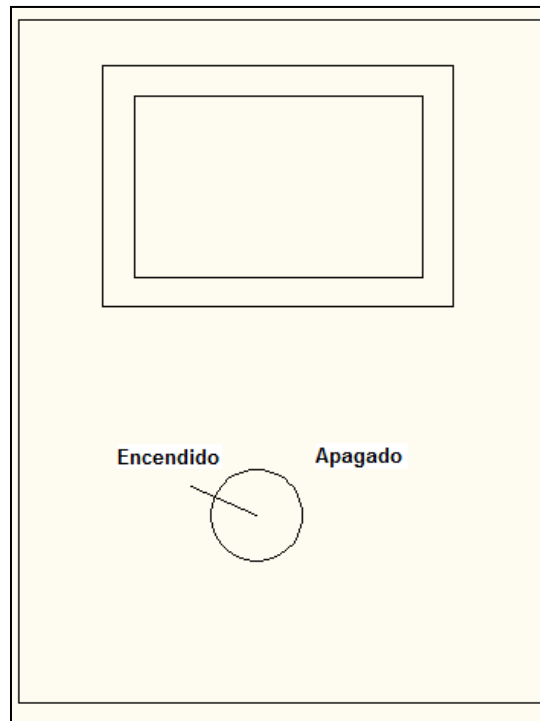


Figura 8 Diseño CAD del Control Central

En la parte frontal del Control Central, se cuenta con una pantalla táctil de 4,3 pulgadas a color, con la cual el operario puede ingresar y recibir información del sistema.

En esta pantalla se cuenta con tres páginas diferentes de información, las cuales interactúan entre ellas como lo muestra el diagrama de flujo de la Figura 9 para tener una comunicación amigable con el usuario.

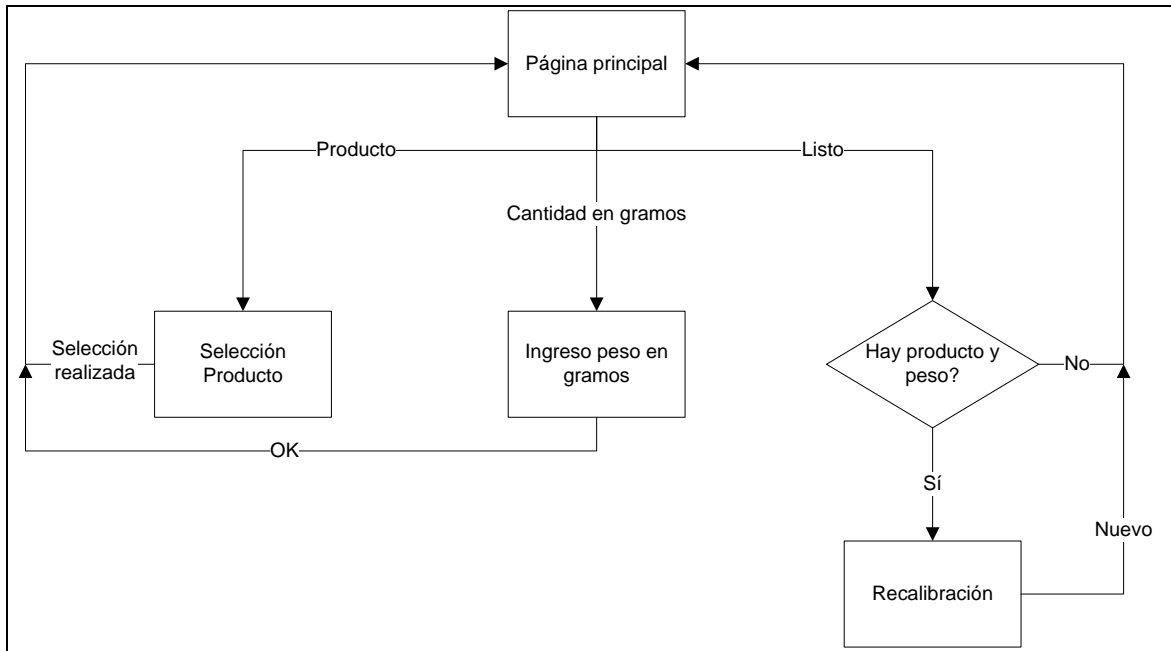


Figura 9 Diagrama de flujo de la pantalla táctil del Control Central

En la Figura 10 se muestra la página principal en la cual se encuentran identificados con letras tres botones, un indicador luminoso y dos espacios para desplegar información.

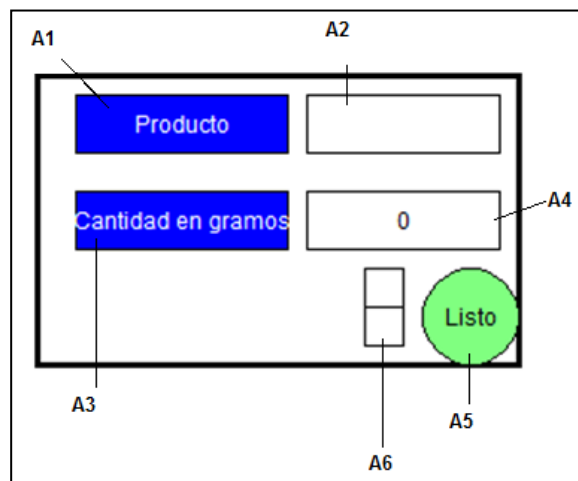


Figura 10 Página principal de la pantalla del Control Central

A continuación se describe cada uno de los elementos de la página principal:

- A1: Da acceso a la página de selección de producto la cual se muestra en la Figura 11.
- A2: Una vez seleccionado un producto en la página de selección de producto, indica cual producto fue seleccionado.
- A3: Da acceso al teclado numérico para ingresar la cantidad que se desea dosificar.
- A4: Una vez ingresado la cantidad en gramos, en este espacio se indica esta cantidad.
- A5: Se presiona cuando ya se ha ingresado el producto y la cantidad en gramos. Además da acceso a la página de recalibración la cual se muestra en la Figura 12.
- A6: Indica el estado del sistema: Amarillo si no se ha ingresado el producto y la cantidad en gramos, verde si ya se ingresó esta información.

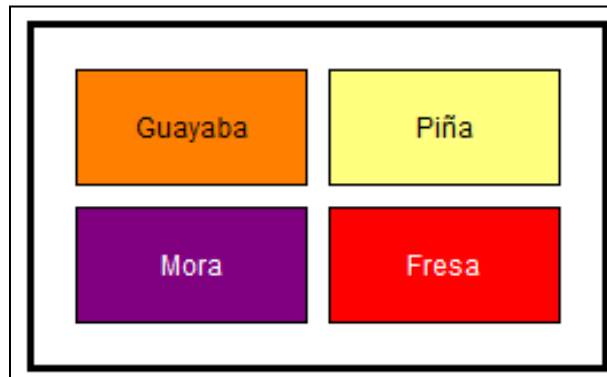


Figura 11 Pantalla de selección de producto

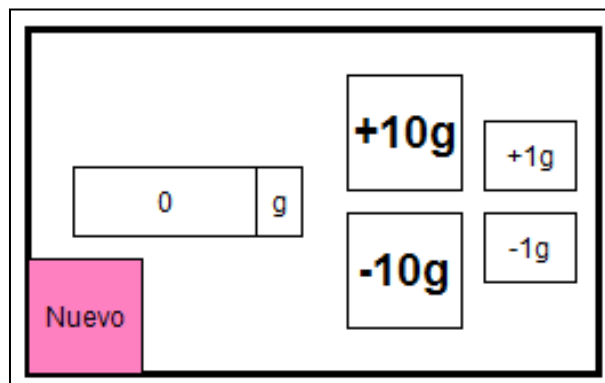


Figura 12 Pantalla de recalibración

El Control Local, cuyo diseño CAD se muestra en la Figura 13 cuenta con las siguientes características:

- Un botón raso color verde de nombre Inicio que al presionarlo el sistema pasará de modo Espera a modo Carrera en el que iniciará a funcionar.
- Un botón tipo hongo color rojo de nombre Pare que al presionarlo el sistema pasará de modo Carrera a modo Espera.
- Un cierre manual de emergencia.

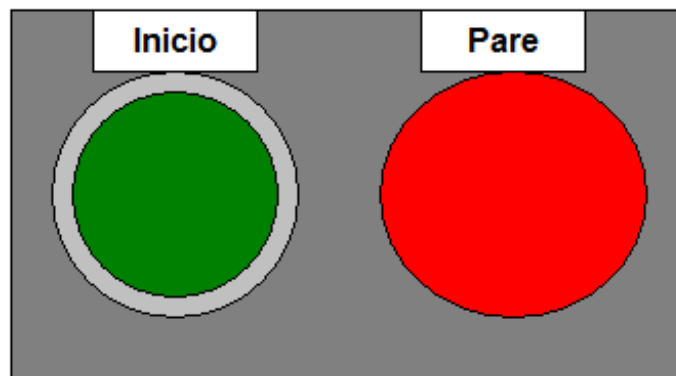


Figura 13 Diseño físico del Control Local del sistema

3.4.2.2 Caja de control

Dentro de la caja de control se encuentran tres bloques: el bloque de seguridad, el PLC y el bloque de bornes de conexión. En la Figura 14 se muestra el diagrama de conexión eléctrica del sistema.

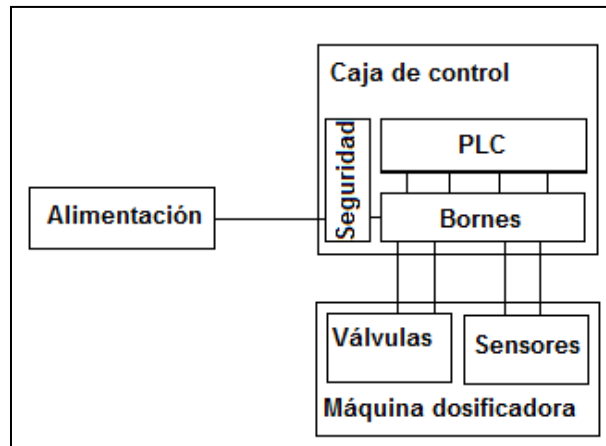


Figura 14 Diagrama de conexión eléctrica del sistema [6]

El sistema se controlará utilizando un PLC CECX de la marca FESTO el cual controlará el sistema neumático mediante la utilización de electroválvulas. Para la programación del PLC, se utiliza el software CoDeSys, el cual el fabricante FESTO proporciona de forma gratuita. El programa se realiza en combinación con diferentes formas de programación: Cuadro secuencial de funciones (SFC), Texto Estructurado (ST) y Diagrama de Bloques de Funciones (FBD) y una pantalla de visualización para la simulación del sistema.

Se cuenta con un bloque de seguridad en el cual se encuentran interruptores y fusibles para proteger a todo el sistema y un bloque de bornes en el cual se enumeran todas las conexiones para poder tener un registro documentado y de esta manera facilitar el cableado y sus futuros cambios. En la Tabla 9 se muestra la numeración y colocación de los bornes, así como rotulación sobre los elementos conectados.

En el bloque de bornes se cuenta con conectores numerados según se indica en la Tabla 9 de modo que cada cable se encuentra rotulado debidamente para reconocer fácilmente a qué corresponde cada conexión y así realizar tareas de cableado y mantenimiento de forma ágil y sencilla.

Tabla 9 Numeración y rotulación de los bornes de la caja de control

Máquina dosificadora				Caja de Control	
Componente	Conexión	Puente	Número Terminal	Registro PLC	Conexión
	24V		1	Fuente CD	24V
	0V		2	Fuente CD	0V
1-1Y1	1A		3		
1-1Y1	1B		4	Coil_1_1Y1	DO-0
1-1Y2	2A		5		
1-1Y2	2B		6	Coil_1_1Y2	DO-1
1-2Y1	3A		7		
1-2Y1	3B		8	Coil_1_2Y1	DO-2
1-2Y2	4A		9		
1-2Y2	4B		10	Coil_1_2Y2	DO-3
2S1	5A		11		
2S1	5B		12		
2S1	5C		13	B1	DI-0
2S2	6A		14		
2S2	6B		15		
2S2	6C		16	B2	DI-1
1S1	Blanco		17		
1S1	Marrón		18	Sensor_posicion	AI-0
1S1	Verde		19		
1S1	Amarillo		20		
1S1	Gris		21	Ref_in_B3	DO-4
1S1	Rosa		22	Cal_in_B3	DO-5
1S1	Azul		23	Ready_B3	DI-2
1S1	Rojo		24		
Pare	8A		25		
Pare	8B		26	Pare	DI-3
Inicio	9A		27		
Inicio	9B		28	Inicio	DI-4
			29		

Los puentes indicados con color rojo son las conexiones a 24V mientras que los puentes color azul son las conexiones a Tierra. Los puentes que se encuentran en color blanco no están conectados.

3.4.3 Seguridad

Según el Decreto Ejecutivo 12715 del MEIC, se debe utilizar el color azul para el señalamiento de riesgos físicos y objetos como por ejemplo un sistema electro-neumático. En la medida de lo posible el color se debe aplicar sobre los objetos (por ejemplo en las tuberías de aire comprimido) o sobre paredes, pisos y superficies (por ejemplo para válvulas, compresor, controles eléctricos). Además de debe señalizar por medio de flechas el sentido de circulación del aire en la tubería. Dentro de la caja de control se debe utilizar el color amarillo.

Otro aspecto de seguridad laboral a tomar en cuenta es la exposición al ruido. Se debe tener el cuidado de conocer el nivel de intensidad de ruido que genera el compresor y los actuadores neumáticos para no sobrepasar los 85 [dB] que permite la legislación costarricense.[7]

Capítulo 4: Descripción del sistema

4.1 Descripción del *hardware*

4.1.1 Actuadores

El cilindro 1-1A1 ocasiona el movimiento mecánico de la bomba de jalea. En el movimiento de retroceso del pistón, el émbolo de la bomba de jalea facilita el paso de jalea desde la tolva hacia la bomba de jalea, mientras que en el movimiento de avance, el pistón empuja el émbolo de la bomba para facilitar el paso de la jalea desde la bomba hacia el ducto dosificador.

La velocidad de recorrido del pistón debe ser regulada en ambos sentidos de movimiento para controlar la duración del ciclo de trabajo del sistema (cantidad de unidades empacadas por minuto), esto se realizará mediante válvulas de estrangulamiento con anti-retorno en ambos escapes de aire del cilindro.

Es necesario poder medir el desplazamiento del pistón en todo su recorrido, de modo que el cilindro debe tener un sensor de posición integrado con el cual, mediante una salida analógica de 0V a 10V se pueda medir su recorrido.

Como parámetros importantes que se deben conocer para dimensionar el cilindro es la carrera del cilindro y la fuerza que debe ejercer el actuador.

La carrera del cilindro se determinó tomando como referencia las dimensiones de la bomba de jalea, siendo la altura de la bomba de 23cm, se utilizará una carrera inferior a esta medida para evitar que el émbolo de la bomba se salga de este rango y tomando en cuenta un margen de seguridad, de esta forma se utilizará una carrera de 150mm.

Con respecto a la fuerza que ejerce el cilindro, se utilizará un émbolo de diámetro similar al diámetro de la bomba de jalea para de esta forma lograr una fuerza suficiente para poder empujar productos de diferente viscosidad. El diámetro del émbolo a utilizar es de 50mm, con el cual se puede ejercer una fuerza teórica de avance de 1178[N] según la hoja de datos, lo que equivale a 120,1226[kgf].

El consumo de aire por minuto de este cilindro es de aproximadamente 177 l/min.

Debido a las características de este actuador, se especificará la marca y el modelo que se utilizó en el diseño del sistema. El actuador utilizado es el cilindro DNCI de la marca Festo, el cual posee el sensor de posición integrado con el que conectando el dispositivo decodificador DADE de la misma marca se logra obtener la salida analógica. En la Figura 15 se muestra el diagrama de conexión de estos dispositivos.

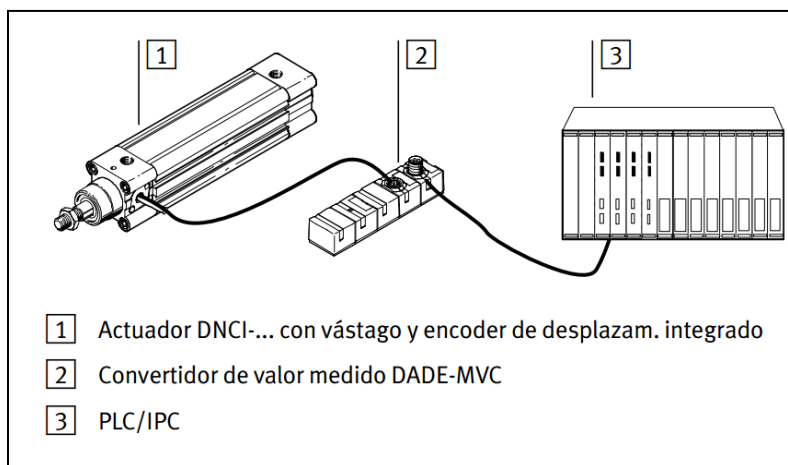


Figura 15 Diagrama de conexión del actuador 1-1A1 al PLC con el sensor de detección de posición [8]

En la sección Sensores se describe el funcionamiento del decodificador DADE el cual es necesario para obtener el adecuado funcionamiento del sensor de posición.

El cilindro 1-2A2 es un cilindro debe ser de efecto doble, en el cual el movimiento de avance abre el paso de jalea desde la tolva hacia la bomba y cierra el paso desde la bomba al ducto dosificador, mientras que el movimiento de retroceso abre la el paso de jalea desde la bomba al ducto dosificador y bloquea el paso de producto desde la tolva hacia la bomba de jalea.

Este pistón debe ser de movimiento rápido, pues en la válvula mecánica de jalea se necesita un comportamiento de abierto y cerrado únicamente, de modo que este cilindro no requiere de estrangulamiento de aire en el escape y se necesita de un cilindro que realice el movimiento de forma rápida. La posición inicial del pistón debe ser en posición final de avance para mantener el paso de jalea cerrado hacia el ducto dosificador.

La carrera de este cilindro se determinó midiendo el recorrido lineal del brazo de la válvula mecánica al cual el pistón estará sujeto para realizar el movimiento de abrir/cerrar de la válvula, este recorrido es de 100mm.

El diámetro del cilindro se seleccionó utilizando como criterio la velocidad de carrera. En la hoja de datos de un cilindro redondo DSNU marca Festo se muestran diferentes gráficas de velocidad con relación al diámetro del émbolo. En la Figura 16 se muestra la relación de velocidad versus masa de un cilindro con un émbolo de 40mm, el cual se seleccionó como actuador 1-2A1.

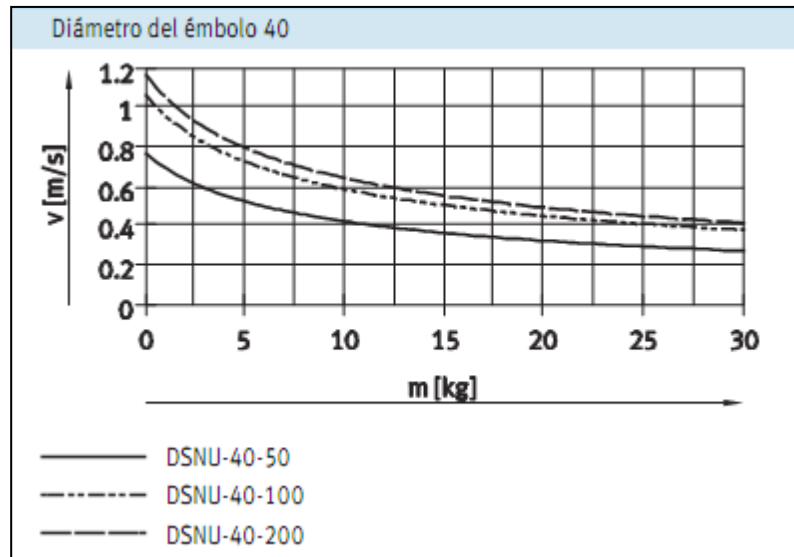


Figura 16 Relación velocidad-masa del cilindro 1-2A1 [9]

En la Tabla 10 y en la Tabla 11 se resumen las características de los actuadores utilizados.

Tabla 10 Resumen de las especificaciones de los actuadores del sistema 1

Cilindro	Presión de aire (bar)	Diámetro pistón (mm)	Carrera (mm)	Tiempo de carrera (ms)	Consumo de aire por carrera (litros)
1-1A1	6	50	150	800	2,45
1-2A1	6	40	100	100	1

Tabla 11 Resumen de las especificaciones de los actuadores del sistema 1 (continuación)

Cilindro	Fuerza máxima teórica de avance (N)	Conexiones Neumáticas	Comentarios
1-1A1	1178	G1/4	Doble efecto Con vástago Con sensor de posición integrado y salida analógica [0-10]V
1-2A1	753	G1/4	Doble efecto Con vástago Con amortiguador regulable

4.1.2 Sensores

Se utilizarán 2 sensores de proximidad para el cilindro 1-2A1: sensor 2S1 y 2S2 para detectar el inicio y final de carrera, y 1 sensor de posición integrado 1S1 en el cilindro 1-1A1 para conocer la posición del pistón desde 0mm hasta 150mm.

Los Sensores 2S1 y 2S2 son sensores de proximidad trifilares de tipo *reed* con conexión NPN. En la Figura 17 se muestra como se debe colocar el sensor en el cilindro y su forma de funcionamiento. El diagrama de conexión de estos sensores se muestra en la Figura 18, donde en el hilo BK se conecta a la entrada del PLC.

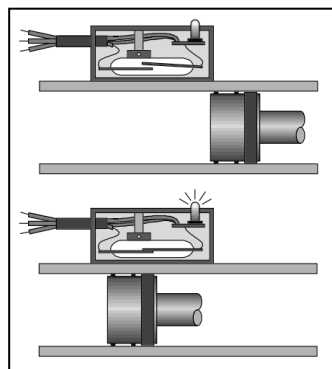


Figura 17 Sensor de proximidad tipo *Reed* [10]

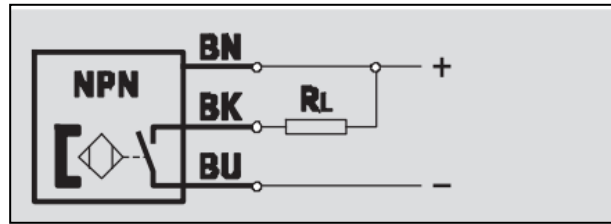


Figura 18 Diagrama de conexión de los sensores de proximidad 2S1 y 2S2 [11]

El sensor de posición 1S1 debe detectar la posición del émbolo del cilindro 1-1A1 en todo el rango de movimiento (desde 0mm hasta 150mm) y tener una salida analógica de 0V a 10V linealmente proporcional a la posición. Para lograr esto se utilizó el cilindro DNCI de la marca Festo en conjunto con el decodificador de posición DADE.

Para la utilización del codificador DADE se debe primeramente calibrar una única vez el dispositivo. Los pasos para dicha calibración los brinda el fabricante Festo en el manual del producto, sin embargo cada vez que el sistema sea apagado y encendido nuevamente, el codificador perderá la referencia, sin embargo el PLC realizará la tarea de buscar la referencia automáticamente. A continuación se especifican las características con las que trabaja el codificador.

La carrera de trabajo del cilindro es de 150mm, el rango de la salida analógica es de 0,1V a 9,9V y el registro de conversión analógico-digital es de 12 bits, de modo que la resolución con respecto a la posición es de

$$\frac{150[mm]}{2^{12}[bits]} = 0,036621[mm]$$

Para calcular la posición x del émbolo con respecto a la referencia, se utiliza la Ecuación $x = \frac{V_{max} - V_{out}}{V_{max} - V_{min}} \times \text{carrera total}$ (3, donde V_{out} es la salida analógica del codificador y carrera total es la carrera de trabajo del cilindro.

$$x = \frac{V_{max} - V_{out}}{V_{max} - V_{min}} \times \text{carrera total} \quad (3)$$

de modo que para este sistema la Ecuación 3 se convierte en

$$x = \frac{9,9V - V_{out}}{9,9V - 0,1V} \times 150mm$$

4.1.3 Válvulas de control

Se requieren 3 válvulas de control para todo el sistema tal y como se describe a continuación.

- 1 válvula de 3/2 vías, normalmente cerrada, con control piloto y retorno de resorte: para abrir y cerrar el paso de alimentación de aire desde el compresor para todo el sistema. Esta válvula cumple la función de seguridad, de modo que en el caso que el sistema se desconecte de la alimentación eléctrica, esta permita evacuar todo el aire del sistema.

Tensión de control: 24 [V]

Flujo de aire máximo: 200 [l/min]

Conexiones neumáticas: G1/8

- 1 válvula de 5/3 vías para controlar el movimiento de avance y retroceso del cilindro 1-1A2 que abre la válvula mecánica de dosificación de la jalea.

Tensión de control: 24 [V]

Consumo de aire: 100 [l/min]

Conexiones neumáticas: G1/4

- 1 válvula de 5/3 vías para el cilindro 1-1A1 que controla la bomba de jalea. Una posición para el avance de la bomba, otra para el retroceso de la bomba y otra de descanso.

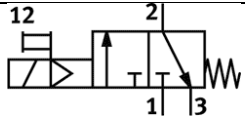
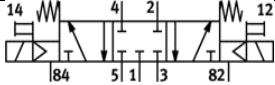
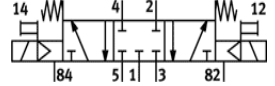
Alimentación eléctrica: 24 [V]

Consumo de aire: 177 [l/min]

Conexiones eléctricas: G1/8

En la Tabla 12 se encuentra un resumen de las especificaciones de las electroválvulas utilizadas en el sistema.

Tabla 12 Resumen de las especificaciones de las electroválvulas del sistema 1

Válvula	Tipo	Control	símbolo	Caudal de aire (l/min)	Presión	Función
1-0V1	3/2 vías normalmente cerrada monoestable	Eléctrico 24V		278	6 bar	Llave principal y de seguridad
1-1V1	5/3 vías centro cerrado	Eléctrico 24V		177	6 bar	Control 1-1A1
1-2V1	5/3 vías centro cerrado	Eléctrico 24V		100	6 bar	Control 1-2A1

4.1.4 PLC

Características del PLC:

- Funcionamiento 24V
- Conexión serie para interfaz de usuario
- 1 entrada analógica para el sensor de posición del cilindro 1-1A1
- 7 entradas digitales para un botón de PARE, un botón de Inicio y 2 sensores de proximidad 1-2S1 y 1-2S2, salida de referencia del sensor 1-1S1 y salida Ready del sensor 1-1S1.
- 8 salidas digitales para excitar las válvulas 1-0V1, 1-1V1, 1-1V2, 1-2V1, 1-2V2, entrada Referencia del sensor 1-1S1, entrada Calibración del sensor 1-1S1 y una luz verde indicadora de activación del sistema.

4.1.5 Unidad de mantenimiento de aire

La unidad de mantenimiento de aire debe contar con los componentes mostrados en la Tabla 13 para cumplir con los requerimientos de la norma ISO 8573-1(2010) de la pureza de aire comprimido en la industria alimentaria.

Tabla 13 Componentes necesarios en la unidad de mantenimiento de aire para cumplir con la norma ISO-8573-1

Componente	Características
Secador de aire	Temperatura de rocío de descarga: 3°C
Filtro de aire	Grado de filtración de partículas sólidas: 1 µm
Filtro de aire submicrónico	Grado de filtración de partículas sólidas: 0,01 µm
Filtro de carbón activo	Contenido residual de aceite <= 0,003 mg/m ³

La unidad de mantenimiento de aire se divide en dos secciones, una que se instala en la salida del compresor (identificada con el código 0-0Z1), y otra instalada en el sitio donde se encuentra el circuito neumático (identificada con el código 1-0Z1).

La unidad 0-0Z1 está compuesta por el secador de aire y el filtro de $5\mu\text{m}$ con drenador de condensados. Esta unidad se debe colocar inmediatamente después del compresor, esto para mejorar la calidad del aire que fluye por las tuberías de la instalación y así evitar su deterioro.

El secador de aire se selecciona según las necesidades de caudal de aire que maneja y el grado de pureza del aire que se requiere. En la Figura 19 se muestra un gráfico que ofrece un criterio para la selección del tipo de secador, esto basado en la temperatura de rocío y el flujo volumétrico de aire.

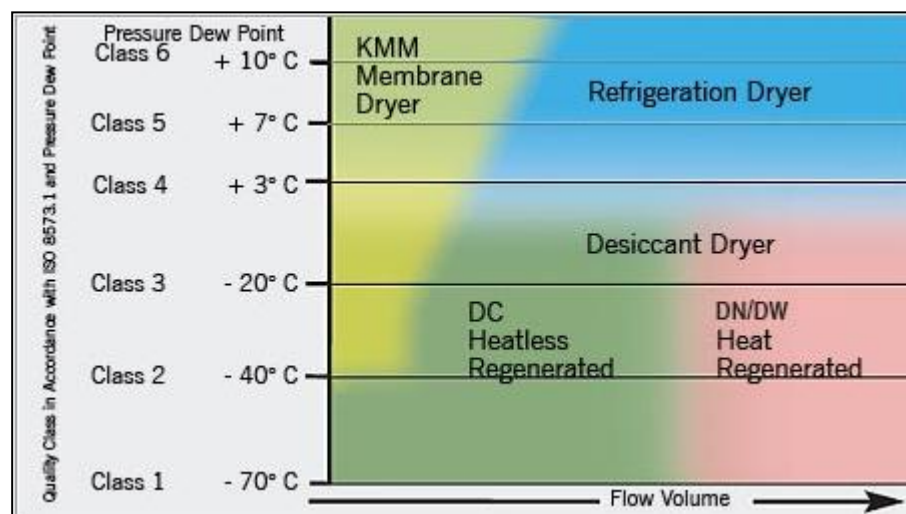


Figura 19 Criterio de selección del secador de aire [12]

Los requerimientos de calidad de aire son cumplidos tanto por el secador de membrana como el secador refrigerativo, pero el criterio de selección se basará según el tipo de aplicación para los cuales se utilizan dichos secadores. El secador de membrana posee ciertas características que lo hacen ideal para ciertas aplicaciones específicas: por ejemplo su reducido tamaño, peso, portabilidad, lo hacen ideal para implementarlo en sistemas móviles, pero su precio es más elevado, por otro lado el secador refrigerativo además de ser más económico, soporta un mayor flujo de aire, lo cual lo hace ideal para aplicaciones en plantas industriales grandes, por lo tanto se utilizará el secador refrigerativo para este sistema.

Después del secador de aire se debe colocar un filtro de micro-partículas de $0,1\mu\text{m}$ y este debe contar con un drenador de condensados para que se elimine el exceso de partículas de agua. Este filtro puede colocarse de forma integrada en el secador de aire.

Luego, en la entrada del sistema 1 se encuentra la unidad de mantenimiento 1-0Z1 la cual se encarga de eliminar la suciedad que el aire obtiene por el paso de la tubería que comunica la unidad 0-0Z1 con la unidad 1-0Z1. Está compuesta por un filtro de polvo de $1\mu\text{m}$ y un filtro de micro-partículas de $0,1\mu\text{m}$. Es importante realizar el filtrado en estas dos etapas para evitar que los filtros se ensucien demasiado rápido.

La primera etapa de filtrado en esta unidad se realiza con un filtro de polvo de $1\mu\text{m}$, y se encarga de eliminar las partículas más grandes que el aire obtiene del paso por la tubería, posteriormente se encuentra el filtro de micro-partículas de $0,1\mu\text{m}$, que elimina las partículas sólidas más pequeñas presentes en el aire que el filtro de polvo no logra eliminar.

4.1.6 Generación del aire comprimido

Algunos de los factores que se deben tomar en cuenta para la selección del tipo y tamaño de compresor son: el medio y la aplicación para la que se utilizará, la presión de trabajo, caudal de suministro y costos.

Para la generación del aire comprimido se utilizará un compresor de motor eléctrico alimentado de 220VAC que es con lo que se cuenta en la planta. Se necesita alimentar el sistema neumático 1 (diseñado en este proyecto) con 278 l/min de aire, adicionalmente como mínimo el compresor deberá alimentar en un futuro un sistema neumático 2 con las mismas características del sistema 1, de modo que se dimensionará un compresor que pueda alimentar dos veces al sistema neumático en estudio, lo que resulta en un consumo de 556l/min de aire comprimido más un margen de prevención de 20% dando un total de 667l/min, lo que equivale a $0,667\text{m}^3/\text{min}$. El sistema operará con 6 bar de presión, pero se deben tomar en cuenta pérdidas de presión en el sistema. Los factores de pérdida de presión en un sistema neumático se encuentran en la Tabla 14, tomando en cuenta esta información, se requiere un compresor de al menos 7 bar de presión.

Tabla 14 Pérdida de presión en los diferentes dispositivos del sistema neumático [3]

Dispositivo	Pérdida de presión (bar)
Secador frigorífico	0,2
Tuberías	0,14
Filtros	0,15

Para generar $0,667\text{m}^3/\text{min}$ de aire comprimido a 7bar de presión, se analizó la utilización tanto de un compresor de pistón como un compresor de tornillo.

Según la hoja de datos de un compresor de tornillo marca Kaeser serie SX, se puede utilizar un compresor de 5,5kW que a una máxima presión de 8bar puede generar 0,8m³/min, lo cual equivale a

$$0,8 \left[\frac{m^3}{min} \right] \times 60 \left[\frac{min}{hora} \right] = 48 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

La potencia nominal de un compresor es 1,1 veces la potencia que especifica el fabricante como potencia del compresor, esto se debe tomar en cuenta para determinar el consumo energético de tal, lo que resulta en una potencia nominal de

$$5,5kW \times 1,1 = 6,05 [kW]$$

Calculando el costo energético del aire comprimido, se determina que el costo de cada metro cúbico de aire comprimido producido por hora es de

$$6,05[kW] \div 48 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 0,126042 \frac{[kW]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]}$$

La tarifa actual general de electricidad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para el año 2012 es de 106 colones por cada kilowatt/hora. Tomando en cuenta lo anterior, se calculará el costo monetario para producir 1 m³ de aire comprimido a 8 bar de presión en la actualidad, el cual es de

$$0,126042 \frac{[kW]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]} \times 106 \frac{colones}{[kWh]} = 13,3604 \left[\frac{colones}{m^3} \right]$$

También se podría utilizar un compresor reciprocante industrial de la misma marca de 6kW el cual genera 0,82m³/min, lo cual equivale a

$$0,82 \left[\frac{m^3}{min} \right] \times 60 \left[\frac{min}{hora} \right] = 49,2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

La potencia nominal es de

$$6 [kW] \times 1,1 = 6,6[kW]$$

El costo energético de cada metro cúbico de aire comprimido producido por hora es de

$$6,6[kW] \div 49,2 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 0,134146 \frac{[kW]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]}$$

y el costo monetario para producir 1 m³ de aire comprimido a 8 bar de presión en la actualidad es de

$$0,134146 \frac{[kW]}{[m^3/h]} \times 106 \frac{colones}{[kWh]} = 14,2195 \left[\frac{colones}{m^3} \right]$$

En Tabla 15 la se muestra una comparación de las características del compresor de tornillo y el compresor reciprocante marca Kaeser analizados

Tabla 15 Comparación de características del compresor de tornillo y el compresor reciprocante

Característica	Compresor de tornillo	Compresor reciprocante
Costo monetario del aire comprimido (colones/m ³)	13,3604	14,2195
Nivel de presión de sonido (dB)	64	79
Ventaja	Menor costo de mantenimiento debido a que utiliza menos componentes que requieren ser remplazados	Menor inversión inicial

A partir de los datos de la Tabla 15, se determinó que el utilizar un compresor de tornillo representa un ahorro energético de aproximadamente un 6% con respecto a la utilización de un compresor reciprocante. Lo anterior en conjunto con la información que se obtiene de la Figura 4 con relación a los costos de un sistema neumático, permite evidenciar que se puede ahorrar un 4,5% del costo total del proyecto analizado en un periodo de 10 años. Otra ventaja del compresor de tornillo es la reducida contaminación sónica que este presenta, lo cual representa una ventaja en temas de salud ocupacional.

4.2 Mantenimiento del sistema

El mantenimiento del sistema se divide en dos modalidades. Las dos deben ser llevadas a cabo como se describe a continuación.

4.2.1 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo consiste en la medición de una o más variables que se considera representativa para determinar el buen o mal funcionamiento del sistema.

Uno de los aspectos que debe ser tomado en cuenta es que conforme los filtros retienen partículas de suciedad, el paso de aire se va obstruyendo cada vez más,

ocasionando una caída de presión en el circuito neumático. Para evitar este problema, cada uno de los filtros cuenta con un sistema que indica en qué momento el filtro requiere ser reemplazado. Esto se realiza mediante un medidor de diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro, y utilizando un visualizador de aguja, el cual se muestra un ejemplo en la Figura 20, se puede determinar mediante caída de presión, cuando un filtro debe ser reemplazado.



Figura 20 Medidor de diferencia de presión de un filtro marca Kaeser [13]

Los filtros purgan el agua y el aceite que estos extraen del aire comprimido. Dependiendo del tipo de filtros, existen algunos que purgan de forma automática y otros de forma manual, de modo que si estos son de forma manual se debe tener la precaución de revisar constantemente el nivel de las purgas para no saturar el filtro y evacuar fluido cuando sea necesario.

4.2.2 Mantenimiento preventivo o programado

Los fabricantes de equipo neumático especifican el mantenimiento que se debe de dar a sus equipos así como su periodicidad, tanto para los compresores, como tuberías y filtros, sin embargo se puede generalizar un programa de mantenimiento para los equipos utilizando compresores de tornillo. Las revisiones periódicas que se deben realizar se pueden dividir en dos: revisión menor y revisión mayor.

Las revisiones menores se deben realizar cada 2000 horas, de modo que si tomamos en cuenta turnos de 40 horas semanales de trabajo esto significa al menos una vez al año. En estas revisiones se hace una revisión y limpieza general de todo el sistema (caja de mando, cableado, mangueras, fajas, actuadores), revisión de filtros de aire y de aceite, revisión del nivel de aceite.

Las revisiones mayores se deben realizar cada 8000 horas lo que significa cada 4 años. En estas revisiones se hace lo mismo que en la revisión menor pero adicionalmente

se debe cambiar el aceite en su totalidad, se ajustan las fajas, se revisan las válvulas y se rempazan empaques, sellos y las piezas dañadas que así lo requieran.

4.3 Descripción del *software*

El control del sistema se desarrolló con el *software* de programación CoDeSys proporcionado por la marca Festo, el cual es de uso libre sin necesidad de licencia y basado en el estándar IEC 61131-3 de programación de PLC. El sistema está conformado por tres diferentes secciones: un diagrama de tipo SFC llamado 'machine', una sección de tipo FBD llamada 'PLC_PRG' y un programa de simulación y visualización llamado 'visualizador' que permite observar el comportamiento del sistema así como la interfaz de usuario. Todas estas lecciones están contenidas en un solo proyecto llamado 'llenadora'

A continuación se presentan cada una de estas secciones con su respectiva explicación.

4.3.1 'Machine'

Es el programa principal del PLC. Este contiene la secuencia de actividades que el PLC debe realizar mediante bloques programados utilizando texto estructurado (ST). Adicionalmente contiene bloques de simulación los cuales tienen como tarea forzar ciertas señales. Los bloques de simulación se identifican con el nombre 'Sim' y se encuentran ubicados al lado derecho del diagrama. Estos bloques deben ser eliminados en el momento en que el sistema se desee implementar.

En la Figura 21 se muestra la primera parte del diagrama de flujo del archivo 'machine', el cual realiza los primeros pasos de la puesta a punto del sensor de posición mostrados en el Anexo 1, donde el cilindro se lleva a la posición de referencia donde la tensión de salida del sensor de posición es 0V y se activan las respectivas señales del sensor 1-1S1.

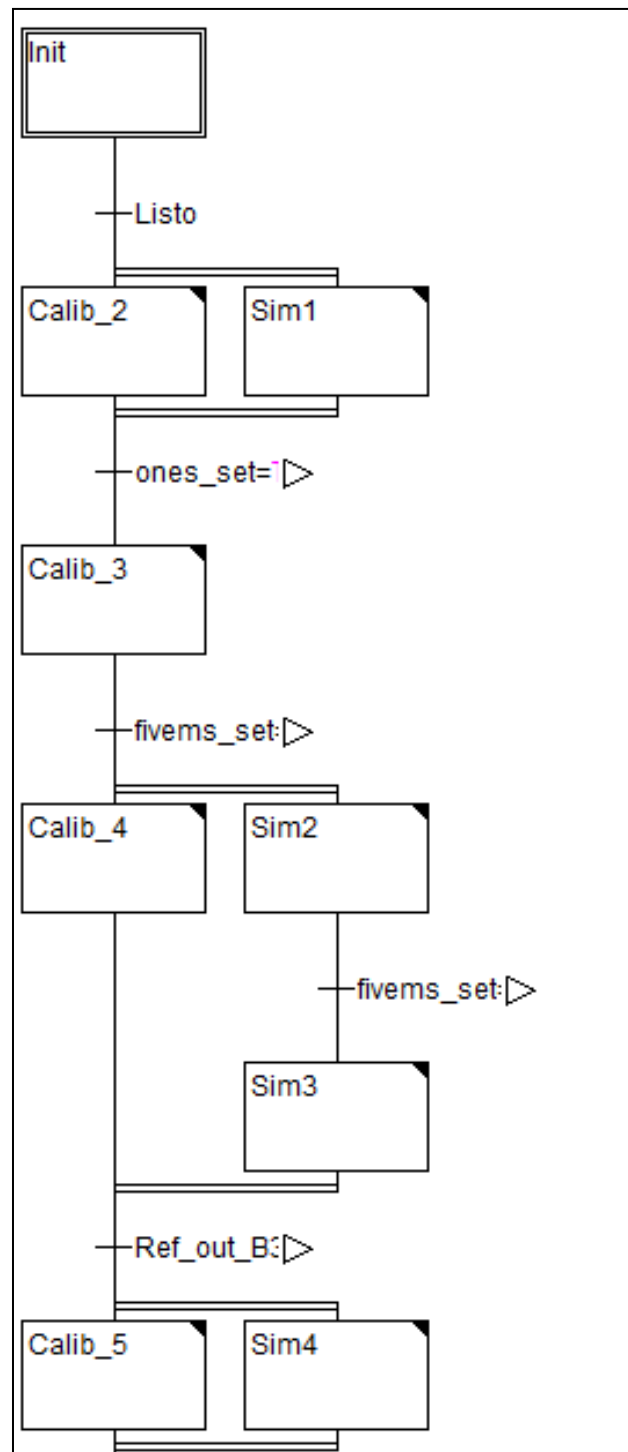


Figura 21 Diagrama de flujo de la sección de calibración del archivo 'Machine'

En la Figura 22 se muestra la continuación de la puesta a punto del sensor de posición 1-1S1, donde dependiendo de si el sensor ya ha sido calibrado anteriormente, se puede brincar esta segunda etapa.

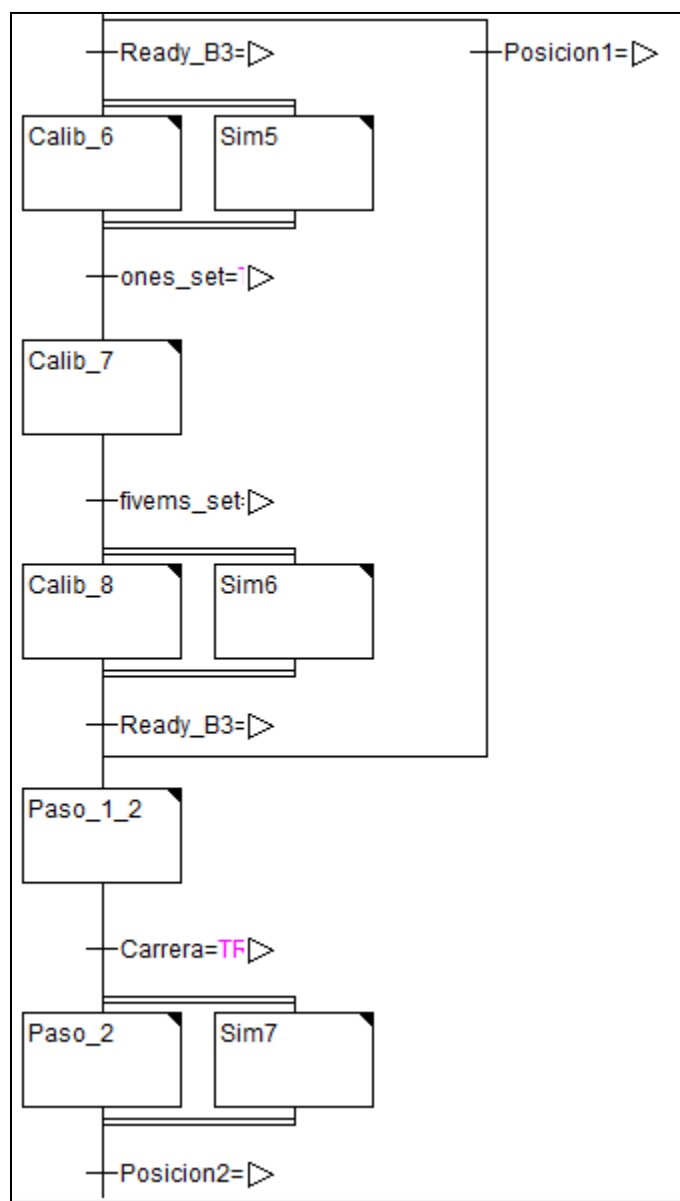


Figura 22 Diagrama de flujo de la sección de calibración del archivo 'Machine' (continuación)

En la Figura 23 se muestra la segunda parte del diagrama de flujo del sistema después de la puesta a punto del sensor de posición. En esta sección el sistema inicia a operar con los botones de Inicio y Pare que son parte del Control Local. Una vez accionado el botón de Inicio el cilindro neumático 1-1A1 entra en modo carrera e inicia su movimiento de retroceso como se indica en la Figura 7 y en la Tabla 8, pero si se presiona

el botón de Pare el sistema es pausado hasta que se presione el botón de Inicio nuevamente.

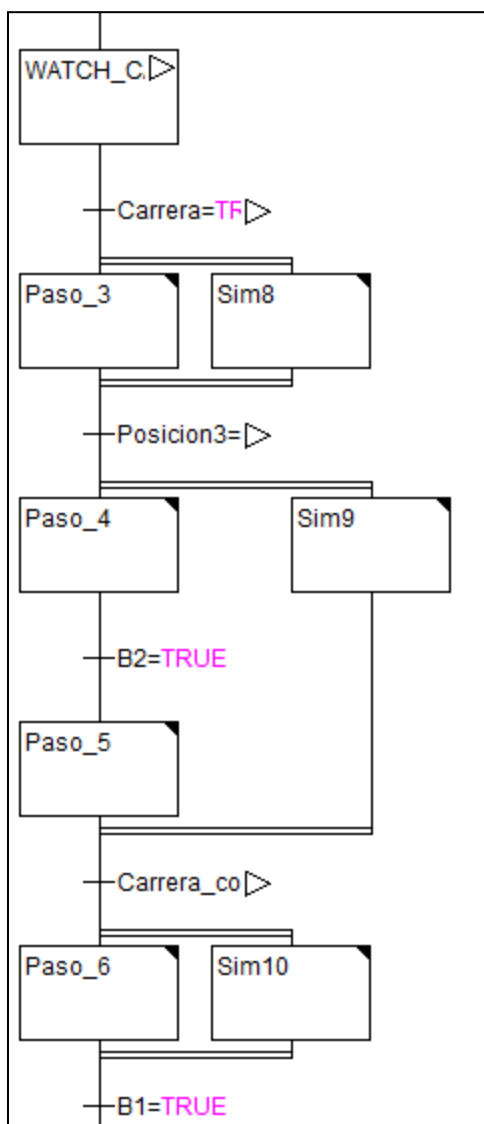


Figura 23 Diagrama de flujo para la puesta en marcha del modo Carrera del sistema

La Figura 24 muestra la tercera parte del diagrama de flujo en la cual el sistema se encuentra en modo de Carrera. En conjunto con el diagrama mostrado en la Figura 23, se realiza el movimiento completo de avance y retroceso para realizar la dosificación del producto. Al final del diagrama de flujo se verifica que el sensor de posición se encuentre debidamente referenciado, si por algún motivo el sensor no está bien referenciado entonces el sistema lo pone a punto nuevamente antes de continuar con la dosificación.

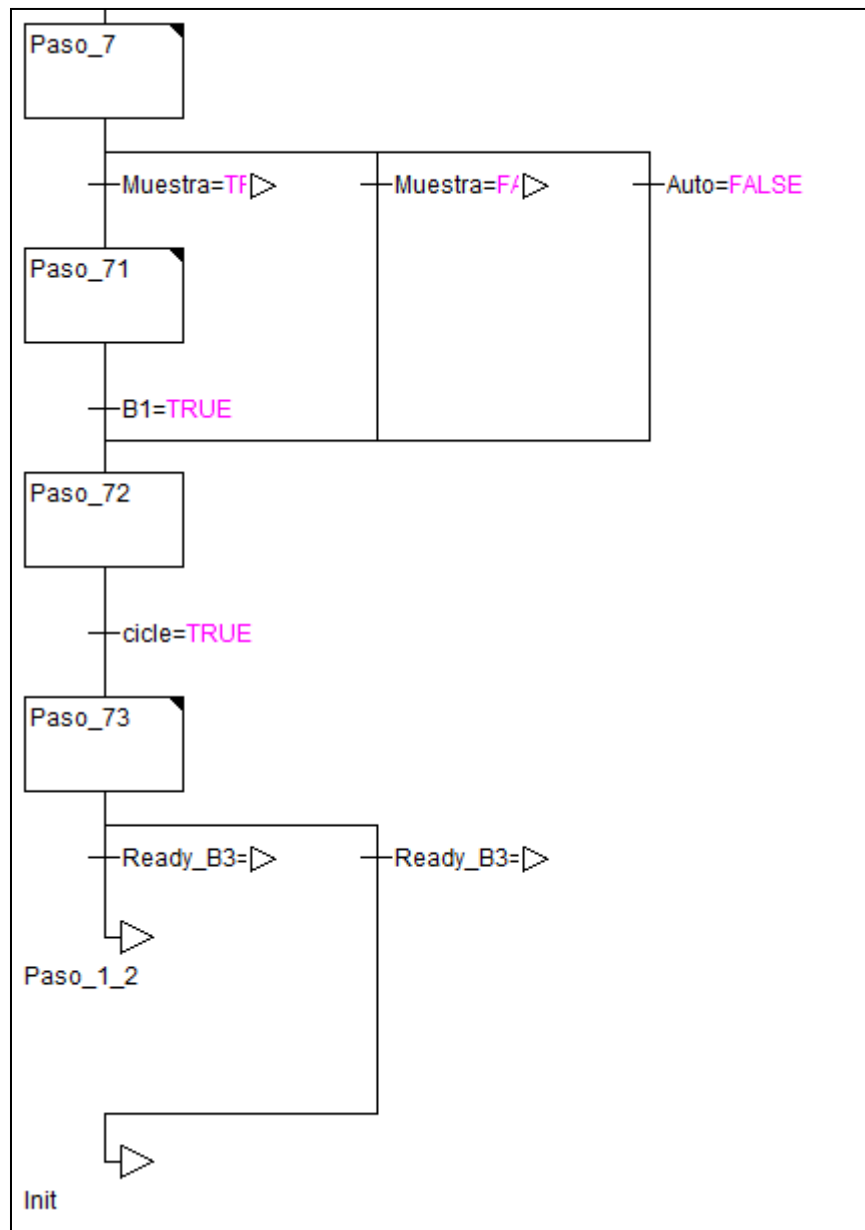


Figura 24 Diagrama de flujo del modo Carrera del sistema (continuación)

4.3.2 'PLC_PRG'

Es un conjunto de diagrama de bloques que procesan las señales necesarias para el adecuado funcionamiento del diagrama de flujo. Cada diagrama de bloques se encuentra debidamente documentado mediante notas en la parte superior del diagrama el cual describe la función u objetivo que dicho bloque tiene. En la Figura 25 se encuentran

los bloques que se encargan de controlar tiempos de ejecución del sistema. Estos bloques consisten en contadores de tiempo que tienen como salida un dato tipo binario que indica cuando el tiempo ha transcurrido. En las Figura 26 y Figura 27 se muestran los diagramas de bloques contenidos en el archivo PLC_PRG que generan las señales requeridas.

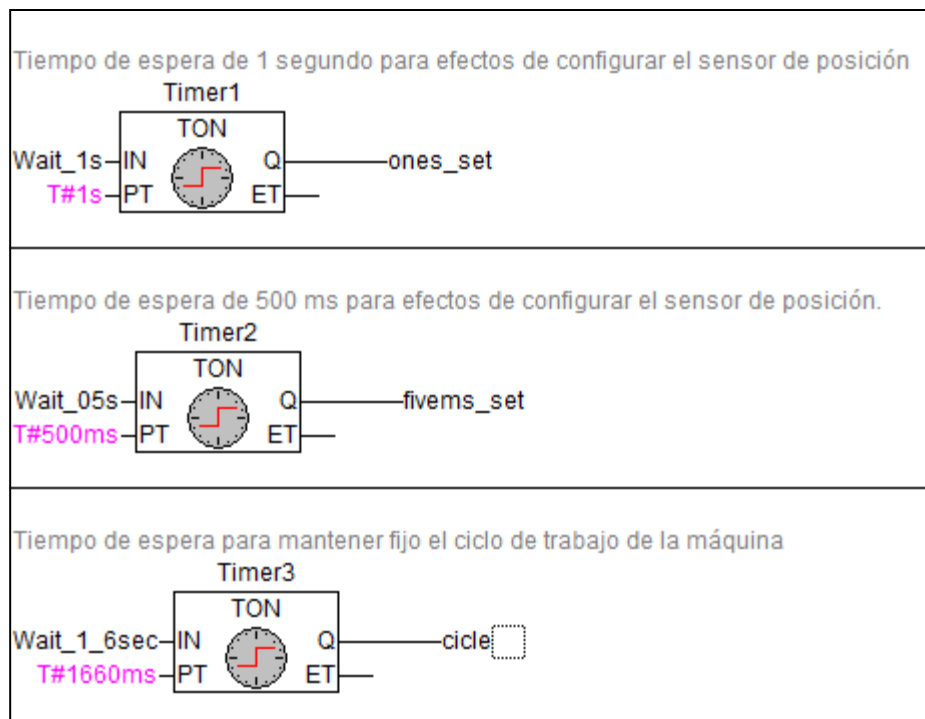


Figura 25 Temporizadores del sistema programados

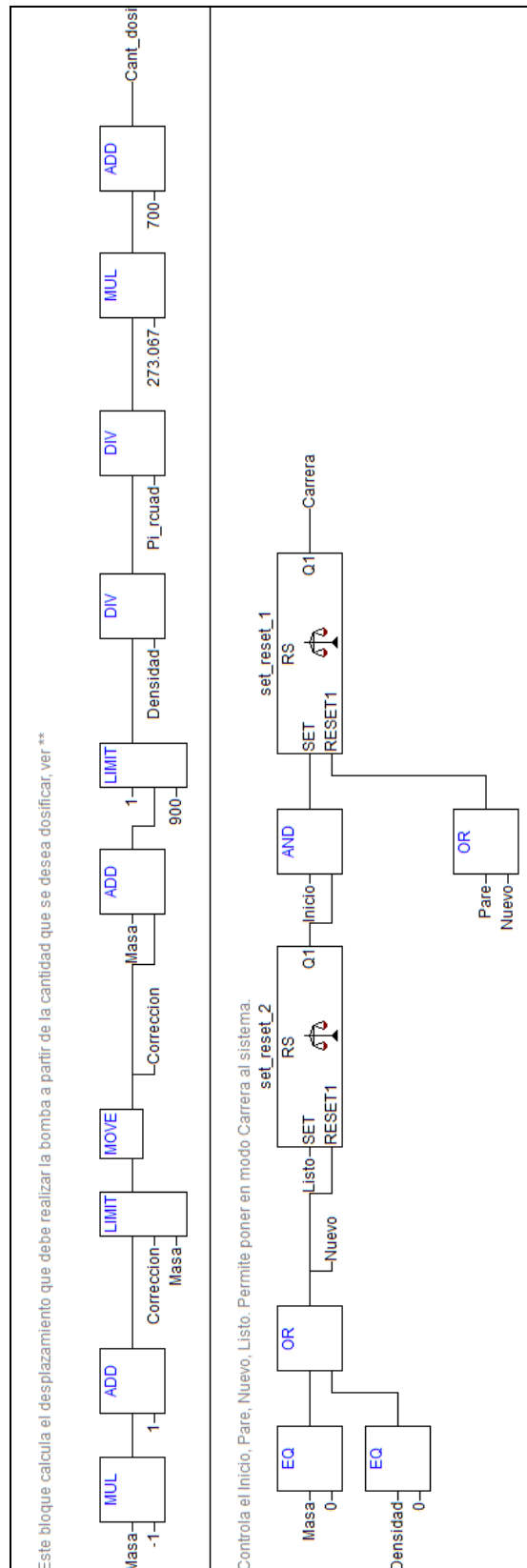


Figura 26 Conjunto de diagrama de bloques del sistema

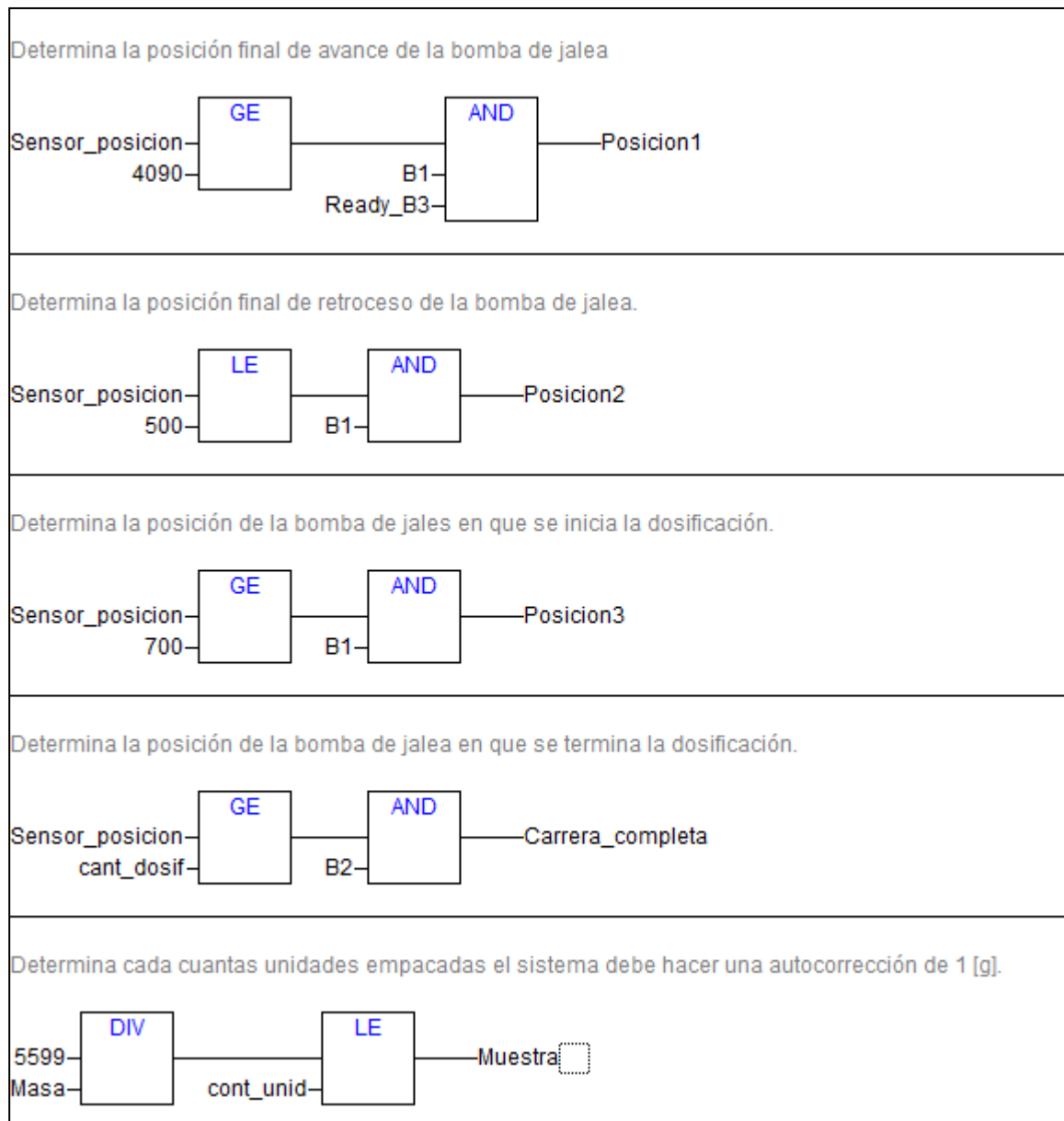


Figura 27 Conjunto de diagramas de bloques del sistema (continuación)

4.3.3 Visualizador

Para la verificación del funcionamiento del diseño, se creó un visualizador gráfico con el programa CoDeSys con el cual se puede tanto simular el sistema también controlar el mismo desde una PC una vez implementado en la planta. En este se pueden ver el

control Local, las pantallas del Control Central y la simulación del sistema mecánico. Los controles se pueden observar en la Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13. Y en la Figura 28 se muestra la representación de los componentes mecánicos los cuales tienen una representación de su comportamiento ya sea por colores o por movimiento de traslación como se indica a continuación.

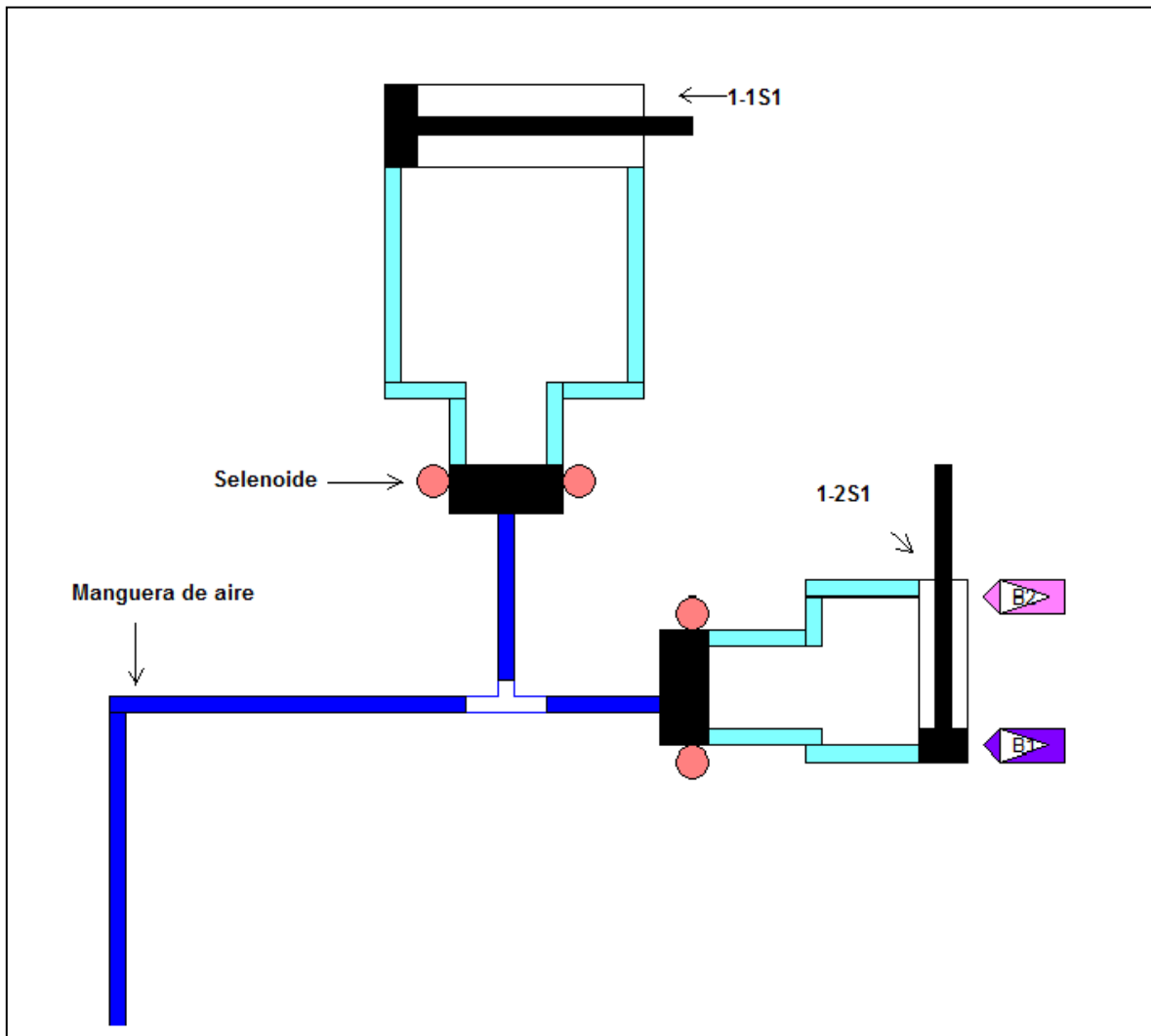


Figura 28 Programa de visualización y simulación del sistema

Manguera de aire:	de color azul cuando hay aire a presión y color celeste cuando no lo hay.
Solenoides:	de color rojo cuando está energizado y de color rosado cuando no lo está.
Actuadores:	Simulan el movimiento de avance y retroceso.

Capítulo 5: Análisis del sistema

5.1 Porcentaje de error del contenido neto de producto dosificado

Debido a que se realizó un diseño teórico del sistema, para efectos de este proyecto se analizará el porcentaje de error del contenido neto del producto dosificado mediante cálculos matemáticos.

A partir de las dimensiones de la bomba de jalea y de las características que tiene el sensor de posición 1-1S1 se logra determinar el error asociado. En la Tabla 16 se muestra un resumen de las características tomadas en cuenta para determinar el error asociado a la cantidad de producto dosificado.

Tabla 16 Resumen de las especificaciones para determinar el error del contenido neto de producto dosificado

Característica	Dimensión
Carrera máxima del cilindro 1-1A1	15 [cm]
Fallo de linealidad del sensor de posición	$\pm 0,02$ [%] con respecto a la carrera calibrada
Densidad de la jalea	1,5 [g/cm ³]

Tomando en cuenta la carrera del cilindro 1-1A1 y el error de linealidad del sensor de posición, se obtiene el margen de error que se obtiene con el diseño del sistema. Tomando como referencia el peor de los casos en el que la carrera del cilindro es la máxima de 15cm, el error de linealidad del sensor de posición es de

$$15[cm] \times \pm 0,0002 = \pm 0,003[cm]$$

y utilizando la Ecuación $V[cm^3] = \pi \times r^2 \times h$ (2 el error en el volumen desplazado en la bomba se calcula como

$$0,003 \times 4^2 \times \pi \cong \pm 0,1597[cm^3]$$

y según la Ecuación $\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{m}{v}$ (1 el error en el contenido neto de producto dosificado es de

$$\pm 0,1597[cm^3] \times 1,5 \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \pm 0,2262[g]$$

Este error ocurrirá si la dosificación se ejecuta siempre bajo las mismas condiciones, sin embargo se sabe que como todo sistema real y como lo confirman las mediciones previas mostradas en la Tabla 4, el sistema sufre variaciones en las condiciones de operación como la variación de la presión ejercida por la cantidad de producto presente en la tolva y las características de composición de la jalea, estos cambios son difíciles de predecir pues no son ejecutados de manera sistemática de modo que se deben realizar acciones manuales para contrarrestar estos cambios sin incrementar el costo económico del sistema. Debido a esto, el sistema debe ser

recalibrado constantemente para contrarrestar estos efectos. A partir de la información mostrada en la Tabla 5, se observa que se recomienda recalibrar la máquina cada 93 [s], esto con el fin de mantener el margen de error del contenido neto de producto dosificado en ± 1 [g], esto calculado a partir de las mediciones de masa realizadas en la planta donde cada 93 [s] el contenido neto de masa muestreado cambió en 1 [g], resultados que se muestran en la Tabla 4. Sumando aritméticamente estos dos errores, se logra obtener un error absoluto de $\pm 1,2262$ [g] para cualquier cantidad de jalea que se esté dosificando. El sistema mediante un indicador luminoso notifica al operario que debe realizar una prueba de masa dosificada para verificar que el contenido neto de producto es el adecuado, esto para cumplir con las especificaciones de muestreo del MEIC para productos pre-empacados.

A partir del tiempo de re-calibración recomendado y conociendo la cantidad de producto que estaba siendo empacada durante las mediciones, se puede obtener una referencia en términos de masa para realizar las calibraciones, esto significa que se puede conocer cada cuanto (en gramos) se debe re-calibrar la máquina para realizar una corrección de un gramo.

Si se divide el tiempo recomendado para re-calibración entre el ciclo de trabajo de la máquina se obtiene

$$\frac{93[s]}{1,661[s]} = 55,99 \text{ empaques}$$

y multiplicando por el contenido en gramos de cada empaque

$$55,99 \times 100[g] = 5599[g]$$

se obtiene cada cuantos gramos dosificados se debe realizar una corrección de 1 [g] (esto debido a que mientras la tolva va reduciendo el volumen de producto contenido así se va reduciendo la cantidad de jalea que se dosifica).

A partir del cálculo anterior, se diseñó una función de ajuste automático la cual calcula cada cuantas unidades empacadas se debe realizar un ajuste de 1 [g] a partir del tamaño del envase que se está empacando y los gramos totales calculados para realizar el ajuste y de este modo mantener un error de $\pm 1,2262$ [g] para cualquier tamaño de empaque y al mismo tiempo permitir la re-calibración manual.

Conociendo el error absoluto que maneja el sistema, se calcula el error porcentual que tendrá cada uno de los tamaños de empaque de jalea. En la Tabla 17 se muestra el error porcentual para cada una de las presentaciones que se empacarán con el sistema propuesto.

Tabla 17 Error relativo de masa dosificada para cada una de las presentaciones de jalea a empaacar

Presentación [g]	Error relativo [%]
100	1,2262
130	0,9432
225	0,5450
300	0,4087
330	0,3716

De las mediciones realizadas en el sistema antiguo de error de masa dosificada y el cálculo teórico de error de masa dosificada en el sistema diseñado, se hizo una comparación para obtener un indicador de mejora del sistema. A partir de las mediciones mostradas en la Tabla 4 del error promedio de masa dosificada el cual es de 2,72 [g] y comparando esto con el error absoluto obtenido teóricamente en el sistema diseñado el cual es de 1,2262 [g], se obtiene un porcentaje de mejora de aproximadamente un 55% en el error de masa dosificada para el caso más crítico el cual es en empaques de 100 [g].

5.2 Simulación de los actuadores

Los actuadores cilíndricos neumáticos se simularon utilizando el *software* de simulación y dimensionamiento GSED proporcionado por Festo. Mediante este *software* se logra determinar el consumo de aire, tiempo de posicionamiento, gráficas de velocidad, entre otros parámetros.

En la Figura 29 y en la Figura 30 se muestran los resultados de la simulación de un actuador cilíndrico con las características del actuador 1-1A1 y del actuador 1-2A1 respectivamente. En esta simulación se muestran tres gráficas distintas: Diagrama Recorrido/Velocidad/Tiempo, Diagrama Presión/Aceleración/Tiempo y Gráfica de presión de amortiguamiento, así como una serie de mediciones como el tiempo de posicionamiento, velocidad promedio, velocidad de impacto, velocidad máxima, energía del impacto, consumo de aire mínimo y la regulación del estrangulamiento del aire de escape. A partir de esta información se calcularon algunos parámetros importantes.

Tomando el tiempo total de posicionamiento realizando toda la carrera del cilindro 1-1A1, se puede calcular el tiempo máximo del ciclo de trabajo del sistema el cual es de 1,66[s] debido a que el tiempo de posicionamiento del actuador 1-2A1 es mucho menor, siendo el ciclo de trabajo muy similar al ciclo de trabajo del sistema actual que es de 1,661[s] tal y como se muestra en la Tabla 2. Debido a que el actuador no requiere realizar todo el recorrido durante su operación, fue necesario implementar un control de

tiempo para que independientemente de la cantidad de producto que el sistema esté dosificando el ciclo de trabajo se mantenga invariante, este control de tiempo es realizado por el Timer3 de la sección de diagramas de bloques del sistema.

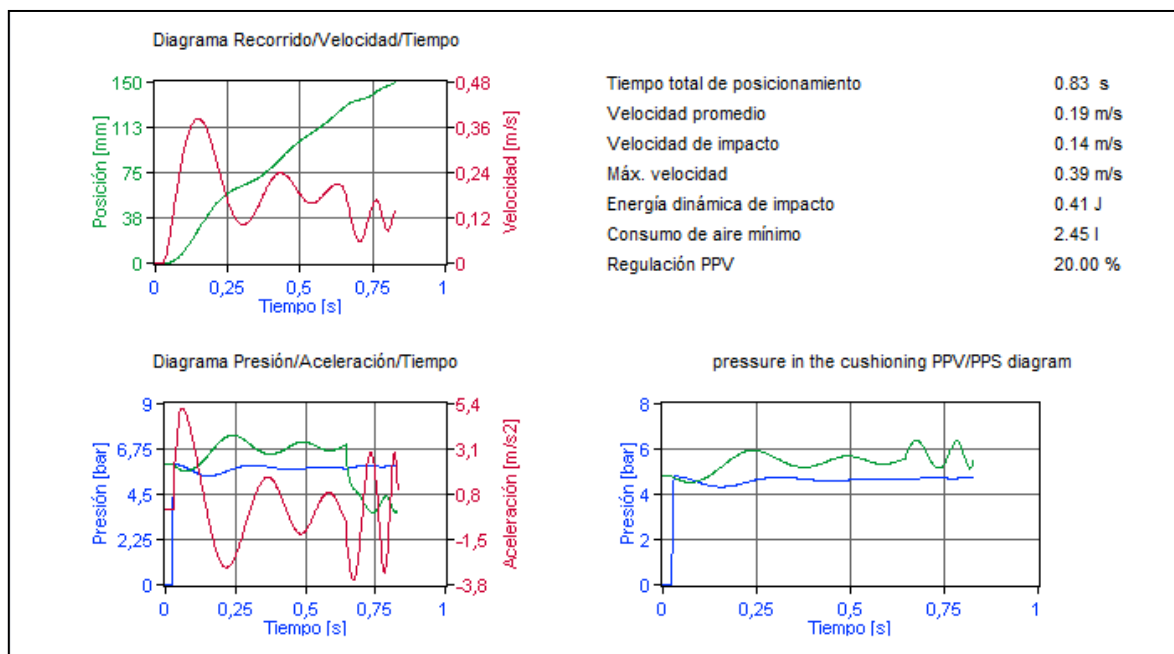


Figura 29 Resultados de la simulación del actuador 1-1A1 utilizando el *software* GSED [9]

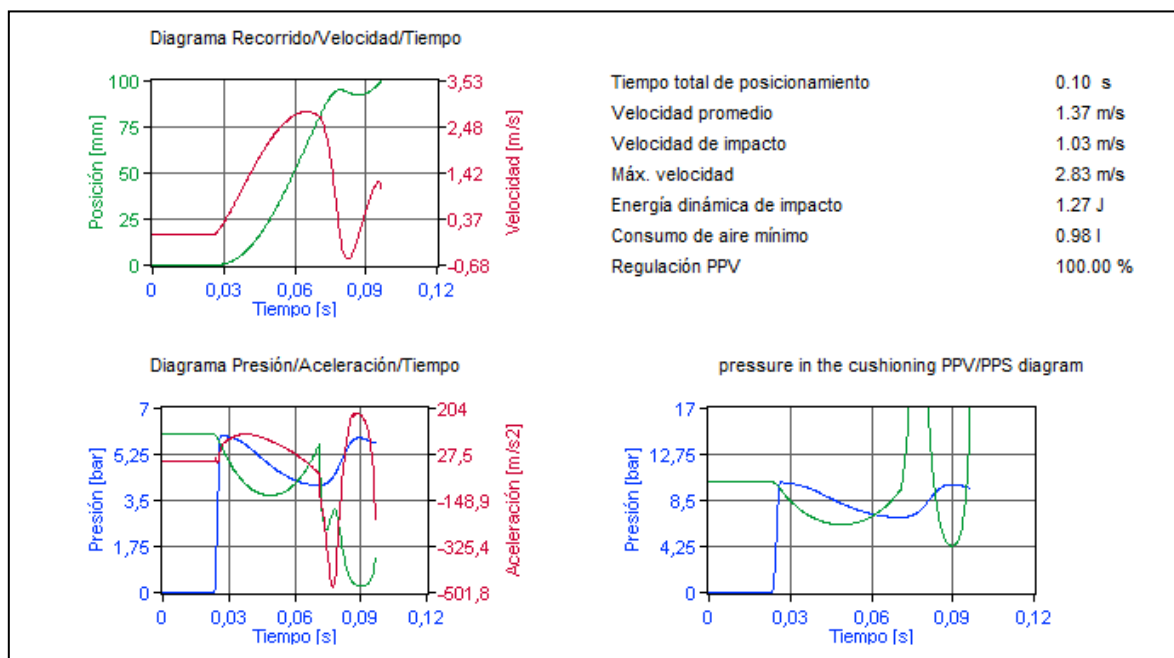


Figura 30 Resultados de la simulación del actuador 1-2A1 utilizando el *software* GSED [9]

5.3 Manejo del sistema por parte de los operarios

Para medir la capacidad de los operarios de manejar tanto el Control Local como el Control Central se realizó una prueba guiada a los tres operarios que se encontrarán en contacto con la máquina dosificadora y quiénes serán los encargados de llevar a cabo la dosificación de producto en la planta. Esta prueba guiada consiste en realizar diferentes tareas que van siendo indicadas por un evaluador las cuales consisten en ejecutar maniobras que deberán ser dominadas a la hora de operar la máquina. Antes de realizar la prueba, se llevó a cabo una capacitación del personal, donde se dio una explicación del funcionamiento del sistema así como la funcionalidad de los controles, además de realizar ejercicios similares a la evaluación para asegurarse de que el operario se encuentre en la capacidad de realizar todas las tareas que se le solicite en la evaluación. Para realizar dicha prueba, se utilizó un simulador de pantallas táctiles el cual fue implementado en computadora, en el cual los operarios mediante la utilización del ratón de la computadora son capaces de tener la misma interacción que tendrán con la pantalla del sistema real.

En la Figura 31 se muestra el machote de la evaluación que se realizó a los operarios y en la Tabla 18 se muestra el resultado de la evaluación en tres operarios.

Tarea	Marque si realizó con éxito la tarea	Marque si no logró realizar la tarea
Seleccione jalea de guayaba como producto		
Cambie el producto a jalea de piña		
Indique que se empacarán unidades de 100g		
Inicie la dosificación		
Detenga la dosificación		
Inicie la dosificación nuevamente		
Corregir la cantidad dosificada en +3g		
Detenga la dosificación		
Cambiar el producto a jalea de fresa		
Inicie la dosificación nuevamente		

Figura 31 Prueba de manejo del sistema aplicada a los operarios que manejarán el sistema

Tabla 18 Resultados obtenidos de la evaluación sobre el manejo del sistema por parte de los operarios

Tarea	Porcentaje de operarios que realizaron bien la prueba
Seleccione jalea de guayaba como producto	100%
Cambie el producto a jalea de piña	100%
Indique que se empacarán unidades de 100g	100%
Inicie la dosificación	100%
Detenga la dosificación	100%
Inicie la dosificación nuevamente	100%
Corregir la cantidad dosificada en +3g	100%
Detenga la dosificación	100%
Cambiar el producto a jalea de fresa	100%
Inicie la dosificación nuevamente	100%

5.4 Tiempo de calibración y re-calibración del nuevo sistema

Se realizaron pruebas con los operarios para determinar el tiempo que toma hacer tanto la calibración como la re-calibración del sistema. Para llevar a cabo dichas pruebas se utilizó el Visualizador de CoDeSys y las interfaces de usuario creadas. Esto con el objetivo de comparar el tiempo que toma realizar esta tarea en el sistema automatizado y en el sistema anterior. Para esta prueba primeramente se indicó al operario como se debe utilizar el sistema y su modo de funcionamiento. El operario no requiere de ningún conocimiento técnico para realizar esta operación.

En la Tabla 19 se muestra la diferencia del tiempo necesario para realizar la calibración con el sistema antiguo y el sistema diseñado, esto con el propósito de mostrar el tiempo que se logra reducir para realizar la misma tarea en ambos sistemas.

Tabla 19 Tiempos promedio de calibración y recalibración del sistema simulado

actividad	tiempo promedio del sistema nuevo (s)	Tiempo promedio del sistema anterior (s)	Diferencia (s)	Porcentaje de reducción de tiempo (%)
tiempo promedio de cada calibración	12,98	277	264,02	95,31
tiempo promedio de cada re-calibración	4,82	30,86	26,04	84,38

5.5 Capacidad de producción del nuevo sistema

Conociendo el ciclo de trabajo del sistema (el cual es de 1,661[s]), se puede determinar cuántas unidades se pueden empacar por unidad de tiempo. El sistema tiene la capacidad de empacar 36,12 unidades por minuto, todas estas con un margen de error dentro de lo permitido por el MEIC.

El tiempo promedio ahorrado en tareas de calibración y recalibración es aprovechado en el envasado de producto, de modo que este ahorro de tiempo significa a la vez un incremento en la producción. Conociendo el ahorro de tiempo por calibración y recalibración de la máquina, este ahorro se puede contabilizar en cantidad de unidades empacadas, empacando aproximadamente 159 unidades más por tiempo ahorrado de calibración y 15,67 unidades más por tiempo de ahorro de cada recalibración y se sabe que la máquina se calibra 3 veces por hora. Sumando el total de unidades empacadas por hora, se calcula que se puede lograr empacar hasta 206 unidades más por hora, todas estas con un margen de error inferior a un 1,2261[%] de error de masa.

Considerando que anteriormente se empacaban aproximadamente 1800 unidades por hora sin control alguno del error del contenido neto de jalea y que se podría mejorar la producción en 206 unidades por hora con un 100[%] de las unidades dentro del rango de error permitido, se puede asegurar que la mejora en la producción de unidades envasadas dentro de los márgenes de error permitidos es de un 11,6[%], sin embargo esta mejora podría ser superior pues se asegura que el 100[%] de las unidades empacadas cumple con los requerimientos de error de contenido neto.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. El error absoluto de contenido neto de masa dosificada para cualquier tamaño de envase es de 1,2262 [g], lo que significa un error del 1,2262% para el empaque de 100 [g], 0,9432% para el de 130 [g], 0,5450% en la presentación de 225 [g], 0,4087% para 300 [g] y 0,3716% en 330 [g], manteniendo el porcentaje de error de todas las presentaciones dentro de los límites permitidos por el MEIC.
2. El sistema diseñado permite ahorrar un promedio de 4 minutos con 24 segundos en el tiempo de calibración en comparación con el sistema anterior en el cual el tiempo requerido para calibración era de 4 minutos con 37 segundos, lo cual significa una reducción de aproximadamente un 95% del tiempo invertido en realizar esta tarea, sobrepasando las expectativas de ahorro de tiempo de calibración en un 45% según lo planteado inicialmente.
3. Los tres operarios que estarán a cargo del manejo del sistema de dosificación automatizado lograron realizar el 100% de las tareas evaluadas en un tiempo promedio de 1:30 [min:s], de esta forma se comprueba que los operarios se encuentran en la capacidad de utilizar la interfaz de usuario de manera correcta, superando el 90% de efectividad establecido como mínimo establecido en la evaluación.
4. El incremento en la producción es de al menos 206 unidades empacadas por hora, lo que significa que el incremento de unidades empacadas que cumplen con la regulación de error de contenido neto es de al menos un 11,6[%], además se asegura que el 100[%] de las unidades empacadas cumplen con los requerimientos establecidos por el MEIC.

6.2 Recomendaciones

1. Incluir en el sistema un sensor de nivel en la tolva y de este modo lograr implementar un sistema de control completo, el cual tome en cuenta la presión ejercida por el producto almacenado en la tolva y así reducir este factor de error en la cantidad de producto dosificado en cada empaque.
2. Expandir el sistema de control de modo que la función de los operarios se vea aún más reducida, incluyendo una banda transportadora que manipule los empaques por llenar y los entregue llenos y sellados, así la capacidad de producción incrementará con la misma cantidad de operarios.

3. Tener un mayor control de la densidad de la jalea fabricada y de este modo eliminar la densidad como una fuente de error en la cantidad de producto dosificado.
4. Incluir una balanza en el sistema, de este modo que el sistema logre realizar las correcciones de masa dosificada de una manera automatizada para eliminar el error de medición del operario y asegurarse de que el muestreo se realiza con la periodicidad adecuada.

Bibliografía

- [1] C. Rica. Decreto ejecutivo N 22268-MEIC, NCR 148: 1993 metrología. *Contenido Neto De Preempacados, Publicado En La Gaceta* 1993.
- [2] C. Rica. Reglamento general de higiene para manipuladores de alimentos. *2011(Octubre 22)*, 2008.
- [3] M. J. P. Rodríguez. COSTOS OCULTOS EN GENERACIÓN DE ENERGÍA NEUMÁTICA POR MEDIO DE UN COMPRESOR DE TORNILLO LUBRICADO, Y SUS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.
- [4] T. Cunalata and O. Gabriel. Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores reciprocantes y de tornillo. 2010.
- [5] D. García López. LA PRODUCCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS. *REVISTA DIGITAL CIENCIA Y DIDÁCTICA* pp. 33.
- [6] P. G and S. D, "Documentation for an electropneumatic control system," in *Electropneumatics*, 01/2002 ed., E. Dr. F, Ed. 2002, pp. 113-159.
- [7] R. C. Sibaja. *Salud y Seguridad En El Trabajo* 2002.
- [8] Festo, "Measured Value converter DADE-MVC," vol. 2012, .
- [9] Festo, "Cilindro redondo DSNU," vol. 2012, .
- [10] P. G and S. D, "Components and assemblies in the electrical signal control section," in *Electropneumatics*, 01/2002 ed., E. Dr. F, Ed. 2002, pp. 35-39.
- [11] Festo, "Detector de Proximidad SME-8," vol. 2012, 2012.
- [12] K. C. AG, "Compressed air Drying," vol. 2012, .
- [13] K. C. AG, "Air Filters," vol. 2012, .
- [14] P. Ujarrás. Nuestra empresa. *2011(Octubre 13)*, 2011.

Apéndice

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Glosario

kilogramo-fuerza	Fuerza ejercida sobre una masa de 1 kg por la gravedad estándar de la superficie terrestre
-------------------------	--

Temperatura de rocío de descarga	Temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire produciendo neblina, rocío o escarcha.
---	---

Abreviaturas

CAD	De sus siglas en inglés <i>Computer Aided-Design</i> (diseño asistido por computadora)
------------	--

FBD	de sus siglas en inglés <i>Function Block Diagram</i> (Diagrama de función de bloques)
------------	--

IL	<i>Instruction List</i> (Texto estructurado)
-----------	--

kgf	kilogramo-fuerza
------------	------------------

LD	De sus siglas en inglés <i>Ladder Diagram</i> (Programación en escalera)
-----------	--

MEIC	Ministerio de Economía Industria y Comercio de Costa Rica
-------------	---

PLC	De sus siglas en inglés <i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador Lógico Programable)
------------	---

SFC

de sus siglas en inglés *Sequential Function Chart* (Cuadro secuencial de funciones)

ST




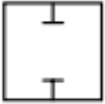
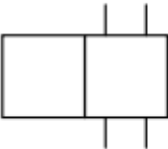
de sus siglas en inglés *Structured Text* (Texto esturcturado)

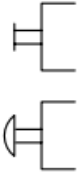

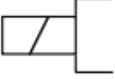
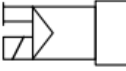
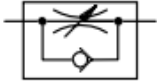
Simbología

En el diseño de estos sistemas se utiliza una simbología específica para la creación del circuito neumático.

Es importante conocer la simbología que se utiliza en este documento para entender el funcionamiento del mismo. En la Tabla 20 se muestra un resumen de la simbología utilizada para las electroválvulas de control con una breve descripción.

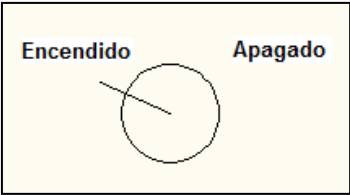

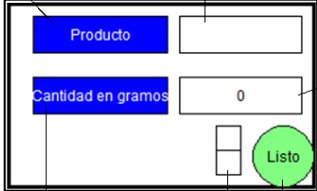
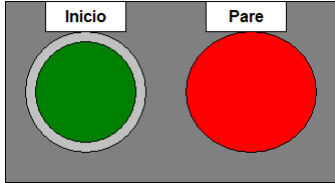
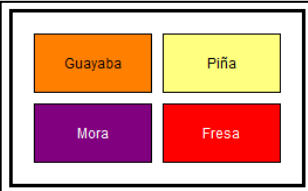
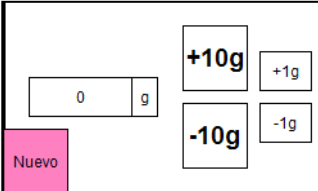
Tabla 20 Resumen de la simbología neumática utilizada en este proyecto [10]

Símbolo	Descripción
	Cada posición de la válvula se representa con un cuadrado
	La cantidad de cuadros indica la cantidad de posiciones con las que puede trabajar la válvula
	La línea dentro del cuadrado indica la dirección del flujo de aire
	Líneas abiertas indican un flujo bloqueado
	Líneas afuera de los cuadrados indican los puertos de conexión de aire a la válvula.

	<p>Se coloca a los lados de los cuadrados. Indica que la válvula puede cambiar de posición de forma manual</p>
	<p>Se coloca a los lados de los cuadrados. Indica que la válvula cambia de posición mediante la fuerza ejercida por un resorte.</p>
	<p>Se coloca a los lados de los cuadrados. Indica que la válvula cambia de posición mediante la fuerza ejercida por un selenoide energizado.</p>
	<p>Se coloca a los lados de los cuadrados. Indica que la válvula cambia de posición mediante la fuerza ejercida por selenoide energizado y un piloto neumático.</p>
	<p>Válvula de control de flujo ajustable en un solo sentido. En el otro sentido el aire fluye libremente.</p>

A.2 Ficha del operario

El siguiente documento muestra los pasos que se deben seguir para la utilización del sistema automático de la dosificadora 1 de jalea.

<div>1. Encendido</div> <div></div> <div>Para encender el sistema y poder ver la pantalla principal, se debe girar el interruptor apuntando hacia la etiqueta de Encendido.</div>	<div>4. Cantidad de producto a dosificar</div> <div></div> <div><ul style="list-style-type: none">- Mediante el teclado numérico se indica la cantidad en gramos que se desea dosificar seguido del botón "OK"- "Clear": borra todo- "Back": borra un espacio- "ESC": salir del teclado sin introducir la cantidad</div>
<div>2. Pantalla principal</div> <div></div> <div><ul style="list-style-type: none">- Se presiona el botón "Producto" para seleccionar el tipo de jalea- Se presiona el botón "Cantidad en gramos" para seleccionar la cantidad de jalea que se desea dosificar- "Listo" cuando ya se seleccionó el producto y la cantidad y se utilizará el Control Local para operar la máquina</div>	<div>5. Control Local</div> <div></div> <div>Una vez presionado el botón listo de la pantalla principal:</div> <div><ul style="list-style-type: none">- Botón "Inicio" inicia la dosificación- Botón "Pare" detiene la dosificación</div>
<div>3. Selección de producto</div> <div></div> <div><ul style="list-style-type: none">- Se presiona el botón del producto que se desea dosificar</div>	<div>6. Corrección de cantidad dosificada</div> <div></div> <div>Cambia la cantidad que se está dosificando sin detener la máquina.</div> <div><ul style="list-style-type: none">- Con el botón "Nuevo" se regresa a la pantalla principal</div>

A.3 Información sobre la empresa

Productos Ujarrás es una empresa familiar del sector alimentario, la cual se dedica a la fabricación de jaleas, mermeladas y pastas de frutas tropicales elaboradas con pulpa de fruta: Guayaba, fresa, piña y mora; gelificadas por medio de azúcar y pectina. Sus operaciones dieron inicios en el año de 1962, actualmente se ubica en San Diego de Tres Ríos, Cartago, Costa Rica. Desde entonces es una compañía en constante crecimiento y modernización. Actualmente cuenta con 50 funcionarios.

La empresa ofrece sus productos de jalea y mermelada en diversas presentaciones: bolsas de 225g y 300g, cremera de 130g y 330g y tipo "*Squeeze*" de 330g para consumidores, así como cubetas plásticas de 23kg y de 5kg, y cajas de cartón de 10kg y 5kg para la industria de alimentos. Actualmente, se cuenta con una única línea de producción para todos los productos que se ofrecen.[14]

Anexo 1

Manual del sensor de posición del actuador 1-1A1



FESTO

**Kurz-
beschreibung**

Brief description

Messwertumformer
Typ DADE-MVC-...
für DNCI-...

Measured value
converter
type DADE-MVC-...
for DNCI-...

- Deutsch
- English
- Español
- Français
- Italiano
- Svenska



691 627
0509NH

5.1 Primera puesta a punto

Durante la primera puesta a punto o cuando la memoria ha sido restablecida (ver sección 6.1), el DADE-MVC debe incluir lo siguiente:

- el punto de referencia (referencing) y
 - la longitud de la carrera de trabajo (calibration).
1. Conecte la tensión de alimentación.
 2. Mueva el DNCL... al punto de referencia (punto cero de la carrera de trabajo).
 3. Active la entrada de referencia (PIN 5 en el S1) por lo menos durante 0,5 s.
 4. Desactive la señal en la entrada de referencia.
Así que aparezca una señal 1 (retardo > 0,1 s) en la salida de referencia (PIN 3 en el S1), el punto de referencia es guardado (el DADE-MVC se halla entonces "referenciado").
 5. Mueva a la posición final de la carrera de trabajo y asegúrese de que el DNCL... se halla detenido.
 6. Active la entrada de calibración (PIN 6 en el S1) por lo menos durante 0,5 s.
 7. Desactive la señal en la entrada de calibración.
Así que aparezca una señal 1 (retardo > 1 s) en la salida Ready (PIN 7 en el S1), el punto de calibración es guardado remanentemente (el DADE-MVC se halla entonces "calibrado").

5.2 Puesta a punto tras un encendido/apagado

Si se desconecta la alimentación, el punto de referencia se perderá.

- Realice de nuevo los pasos 1 ... 4.
Si la referencia es correcta, aparecerá una señal 1 directamente en la salida Ready con el paso 4.

5.3 Resumen

	LED		INPUT		OUTPUT	
	S1	S2	Ref	Cal	Ref	Rdy
Primera puesta a punto						
24 V aplicados	verde par-padeante	rojo	0	0	0	0
Inicio referencia	verde	rojo	1	0	0	0
Fin referencia	verde	amarillo	0	0	1	0
Inicio calibración	verde	apagado	0	1	1	0
Fin calibración	verde	apagado	0	0	1	1
Puesta a punto del sistema calibrado						
24 V aplicados	verde par-padeante	apagado	0	0	0	0
Inicio referencia	verde	apagado	1	0	0	0
Fin referencia	verde	apagado	0	0	1	1

Anexo 2

Tabla de referencia de costos del sistema

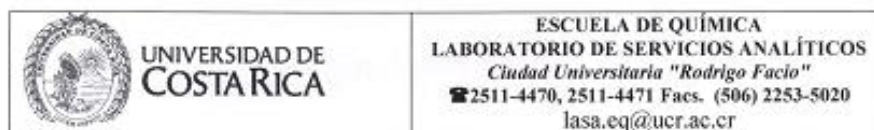
En la tabla se muestra una referencia de los costos referentes a la inversión inicial a partir de las cotizaciones entregadas por diferentes proveedores de equipo de automatización industrial.

Tabla 21 Costos de referencia de los componentes asociados al proyecto

Descripción	Precio de referencia [USD]
PLC e interfaz de usuario	2.000
Caja de control, botones, interruptores, fusibles, riel para montura, cable, bornes y otros componentes electrónicos	700
Filtros de aire	1.000
Secador Refrigerativo	2.600
Electro-válvulas	250
Compresor de aire	4.000
Tubería de aire de nylon	150
Accesorios neumáticos	200
Actuadores	800
Total	11.700

Anexo 3

Resultados del estudio de densidad de jalea de fresa



08 de mayo de 2012

Informe de Análisis N° 498-12

Nombre del solicitante: **Productos Ujarrás S.A.**

Teléfono: 8351-7333

Atención: Sr. Mauricio Corella

Fecha de recepción: 03-05-12

Fecha de análisis: 07-05-12

Descripción de la muestra: una muestra jalea de fresa marca Ujarrás, en envase original de 300 g de capacidad, sellado. Lote: 33.11:04.

Muestreado por: el cliente

Método de análisis utilizado: Gravimetría

Resultados:

Muestra	Densidad (g/mL a 75 °C)
Jalea de fresa	1,33

Este informe no puede ser reproducido, parcial o totalmente, sin la aprobación escrita de este laboratorio. Nulo sin el sello blanco.

M.Q.I. Javier Quesada E.
Químico N.I. 1875
Director del Laboratorio
Laboratorio de Servicios Analíticos

